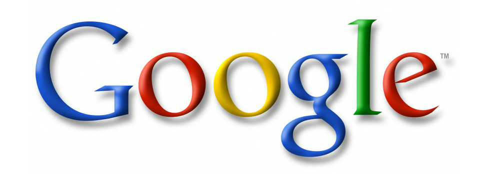
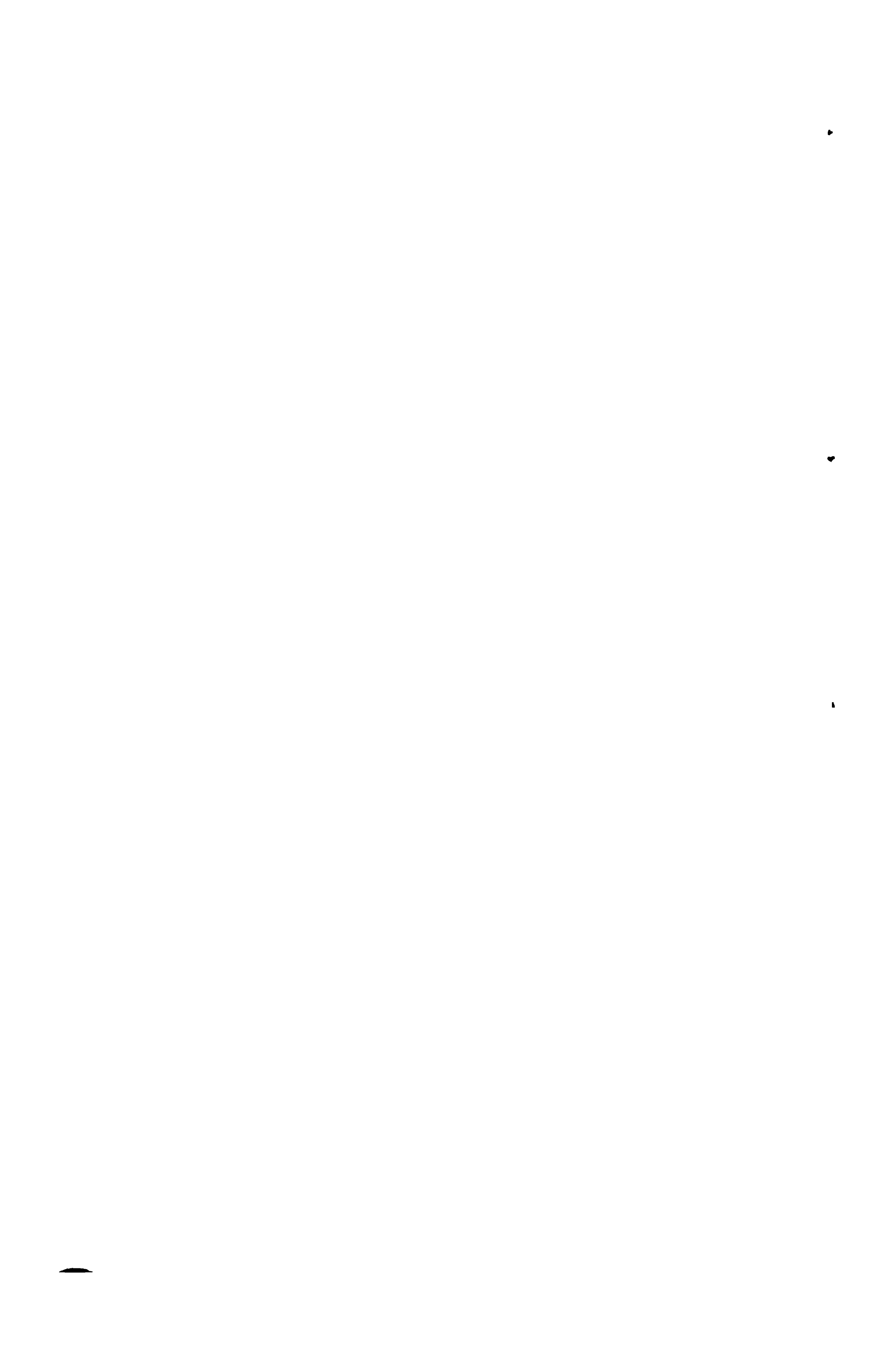

Google





L'UNITÉ

DES

FORCES PHYSIQUES

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

L'UNITÉ

DES

FORCES PHYSIQUES

ESSAI DE PHILOSOPHIE NATURELLE

PAR

LE P. A. SECCHI

DIRECTEUR DE L'OBSERVATOIRE DE ROME
CORRESPONDANT DE L'INSTITUT DE FRANCE (ACADÉMIE DES SCIENCES)
OFFICIER DE LA LÉGION D'HONNEUR

DEUXIÈME ÉDITION

REVUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE

PUBLIÉE SUR LA TRADUCTION ITALIENNE DU D[r] DELESCHAMPS

AVEC 62 FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS

LIBRAIRIE F. SAVY

24, RUE HAUTEFEUILLE

1874

PRÉFACE

DE LA PREMIÈRE ÉDITION ITALIENNE

La grande découverte qui de nos jours préoccupe tous les savants, et qui sera le plus beau titre scientifique de notre époque, est celle de la théorie mécanique de la chaleur ; c'est-à-dire la réduction des phénomènes calorifiques à de simples modalités de mouvement. Exposer les bases de cette théorie, en étendre les applications aux agents impondérables et aux autres forces physiques, tel est l'objet du présent ouvrage.

Que l'on ne s'étonne pas de voir un astronome entreprendre de traiter un sujet regardé d'ordinaire comme relevant des physiciens, car certainement la question de la nature des forces intéresse l'astromomie au plus haut point. En effet, il y a deux manières d'envisager les mouvements célestes : ou bien comme de simples effets d'une force abstraite, la gravité, de sorte que la loi élémentaire de cette force une fois connue, tout le reste s'en déduit par voie analytique ; ou bien comme les effets d'une cause immédiate appartenant à un ordre plus élevé et dont la gravité elle-même ne serait qu'une conséquence. Tant que l'on se borne à calculer les mouvements planétaires, la première hypothèse suffit aux besoins de l'astronome ; mais, lorsqu'on arrive à chercher l'explication des autres phénomènes que nous présentent les comètes, les aérolithes et le soleil lui-même, elle est insuffisante. Non-seulement les apparences physiques des corps

célestes ne peuvent s'expliquer par un principe unique, mais les lois mêmes des mouvements révèlent des perturbations que l'on ne peut négliger. Pour comprendre ces aberrations, il faut recourir à l'action des forces qui régissent la matière, que nous connaissons de près et que, pour ainsi dire, nous manions chaque jour.

De récentes observations ont démontré que dans l'espace planétaire s'exercent encore la répulsion calorifique, la résistance du milieu, les actions magnétiques et électriques, et sans nul doute, de même que la lumière, ces forces sont communes à toute la création et lient ensemble les corps les plus éloignés de l'univers.

En présence d'une idée aussi séduisante, celui qui est entré dans la carrière astronomique après avoir consacré plusieurs années à l'étude de la physique, n'a pu s'empêcher d'être vivement sollicité à déterminer les relations réciproques de ces forces, à en rechercher les principes, à voir s'il est possible de les ramener toutes à une cause commune. Les remarquables progrès accomplis par la science dans ces dernières années ont fait disparaître les principales difficultés qui écartaient les savants d'un problème aussi complexe, et aujourd'hui on ne pense plus que les forces physiques et celles qui régissent les mouvements des corps célestes soient indépendantes les unes des autres.

Personne n'admet plus l'existence du vide absolu dans l'espace planétaire, les forces ne sont plus regardées comme des qualités occultes de la matière, mais comme de purs effets de mouvement. Ainsi s'ouvre aux spéculations des naturalistes un champ jusqu'ici inexploré.

Une telle synthèse a été toujours pour nous un sujet d'études favori. En 1858, dans une séance de l'Académie Tibérine, nous lûmes une dissertation sur cet objet qui fut publiée plus tard avec un grand nombre de notes[1]. Depuis ce moment plu-

[1] Voy. *Giornale Arcadico*, vol. XI, nouvelle série, *De la corrélation des forces physiques*.

sieurs personnes manifestèrent le désir de voir cette thèse traitée avec de plus grands détails dans un ouvrage écrit en italien car jusque-là notre langue ne possédait aucun livre dans lequel les derniers progrès de la science fussent exposés et réunis dans un ensemble synthétique. Les nombreux travaux de ma charge ne me permirent pas de m'occuper de ce travail. Seulement, dans un second opuscule publié ultérieurement, j'abordai cette question [1], et à cette occasion, par la nature même des oppositions que soulevèrent les idées émises dans ce travail, je pus me persuader que nombre d'idées déjà assez usuelles dans la science n'étaient pas encore répandues et suffisamment connues parmi nous. Aussi je résolus de consacrer à la rédaction de ces pages les rares moments de liberté que me laissaient mes autres devoirs.

Dans ce livre je n'ai point la prétention de créer une nouvelle philosophie de la nature, je veux seulement exposer les vues théoriques qui chaque jour s'affirment davantage grâce à une étude plus sérieuse des phénomènes. Le lecteur verra que ces idées nouvelles sont la conséquence directe des travaux accomplis par les savants qui illustrent notre siècle. Qu'il nous suffise de citer Mayer, Séguin, Joule, Thomson, Grove, Hirn, Lamé, Moigno, Tyndall, Clausius, Dumas, Maxwell, Fusinieri, Zantedeschi, Bixio, Turazza, Graham, Bunsen, Foucault, Dupré, Cantoni, etc., qui tous ont fait progresser et ont vulgarisé cette théorie en un très-petit nombre d'années. Et ce seul fait, à défaut de tout autre, parle assez haut pour montrer que l'âge actuel n'a rien à envier aux autres époques scientifiques, même aux plus glorieuses.

Je ne cache pas qu'ayant voulu exposer cette synthèse scientifique de manière à la rendre accessible à la majorité des lecteurs, j'ai rencontré des difficultés plus sérieuses que je ne me les étais figurées tout d'abord. Il fallait dépouiller les démonstrations de leur appareil de formules et de calculs, sans leur

[1] *Lettre sur un problème cosmologique.* Rome (Marini), 1862.

faire perdre leur force ; de plus, les principes fondamentaux ne pouvaient être établis par la voie des mathématiques. En effet, l'analyse géométrique, fort utile quand on veut tirer d'un principe toutes ses conséquences et qui par là donne de précieux moyens de vérification, est tout à fait impuissante à prouver directement la vérité du principe lui-même.

La partie expérimentale elle-même, pour être traitée d'une manière convenable, m'a demandé une grande attention. Sans entrer dans le détail des expériences, ce qui est le propre des ouvrages spéciaux, il fallait rappeler les résultats obtenus, de telle façon qu'on pût en comprendre la signification et l'importance, alors même qu'on n'en posséderait pas une complète connaissance préliminaire. Autrement, j'aurais été ennuyeux pour les uns et inintelligible pour les autres. Me trouvant ainsi enfermé entre deux écueils également dangereux, et dans l'impossibilité d'échapper à l'un et à l'autre, afin d'éviter le second j'ai préféré donner dans le premier : en un mot, craignant d'être incomplet, j'ai préféré être un peu long. Le grand nombre de faits qui se trouvent réunis dans cet ouvrage, surtout en certaines parties, suffisent à montrer qu'un lien commun réunit les diverses branches de la physique, et alors même que le présent travail n'atteindrait pas le but principal en vue duquel il a été entrepris, ce résultat bien que secondaire ne serait certainement pas sans profit pour le lecteur. Le livre que nous présentons est donc rédigé de manière à permettre aux jeunes gens déjà instruits des faits élémentaires de la physique de compléter leurs études, en leur donnant une notion générale de la partie la plus élevée de la science.

Je crois utile de dire dès maintenant que, vu la multiplicité et la difficulté des matières traitées dans les pages qui suivent, leur lecture exigera une attention soutenue. Je ne me suis pas proposé d'écrire une de ces œuvres moitié littéraires moitié scientifiques, où la science est présentée sous une forme attrayante. Ce genre de littérature, très en faveur depuis quel-

ques années, a une grande utilité au point de vue de la vulgarisation scientifique, mais il ne contribue en rien au progrès de la science. Mon intention a été de faire quelque chose qui profite au développement de la philosophie naturelle. Les difficultés n'ont pas fait défaut, mais j'ai toujours été soutenu par la pensée que, quand même j'échouerais dans mon entreprise, elle aurait au moins cela d'utile que peut-être elle donnerait à des savants plus habiles que moi le désir de trouver la solution qui m'avait échappé, en leur montrant combien de précieuses données sont déjà acquises au problème.

C'eût été chose facile que d'introduire en maints passages d'attrayantes digressions, car un sujet aussi vaste se prête facilement à des développements d'un haut intérêt. Je me serais par là rendu plus agréable à lire, mais aussi ces détails n'auraient pas manqué de distraire le lecteur et de l'empêcher de suivre le fil de la démonstration. Et même sous ce rapport, pour faciliter l'enchaînement des raisonnements, j'ai, à la fin de chaque livre, résumé les choses principales qui y sont développées ; si bien qu'en lisant seulement le dernier chapitre de chaque livre, on peut prendre une idée générale de l'ouvrage entier.

J'avais d'abord eu l'intention d'ajouter quelques notes, tant pour exposer diverses théories à peine ébauchées dans le texte, que pour démontrer par le calcul certaines propositions données comme exactes, et même pour en indiquer d'autres plus nouvelles ; je ne l'ai pas fait, car déjà l'étendue de l'ouvrage dépassait les bornes dans lesquelles j'espérais pouvoir le renfermer.

Durant [1] l'impression la science a fait des acquisitions importantes. J'en ai profité au fur et à mesure que j'en avais connaissance, et j'ai vu avec grand plaisir que tous les faits nouveaux étaient autant de preuves nouvelles en faveur de ma thèse et qu'aucun d'eux ne s'inscrivait en faux contre les vues théo-

[1] L'édition fut commencée dans les premiers jours d'août 1863.

riques exposées dans cet essai. Je suis donc en droit d'espérer que l'exactitude de ces théories se confirmera chaque jour davantage à mesure que les phénomènes de la nature seront mieux connus.

Peut-être considérera-t-on certaines conjectures ici exposées comme un peu hasardées ; mais comme cela ne veut pas dire, tant s'en faut, qu'elles sont erronées et dénuées de tout fondement, j'espère que le lecteur impartial, avant de les rejeter, voudra bien les examiner. De plus ce sont des conjectures, et nous ne les donnons que pour telles.

Ce dont je ne saurais m'excuser aussi facilement, c'est d'avoir osé embrasser un sujet trop vaste et de beaucoup supérieur à mes forces, et j'avoue que ce travail une fois terminé, n'aurait pas été imprimé, si l'on ne m'avait pas vivement sollicité à en entreprendre la publication. Sans cette proposition, que j'ai acceptée avec plaisir, je me serais regardé comme amplement récompensé de ma peine par la satisfaction que j'éprouvais d'avoir pu enfermer dans une synthèse générale toutes les forces de la nature. Puissé-je avoir été assez heureux dans l'exposé de ma théorie pour faire goûter aux autres cette même satisfaction.

A. SECCHI.

Rome, 10 avril 1864.

PRÉFACE

DE LA PREMIÈRE ÉDITION FRANÇAISE

Ce livre, publié pour la première fois en 1864, rencontra dans le public scientifique un accueil si favorable que l'édition se trouva promptement épuisée. Bien qu'écrit en italien, il obtint en France un succès assez grand pour me déterminer à accepter la proposition du docteur Deleschamps d'en faire une édition française. Toutefois cette édition n'est pas une simple traduction de la première ; elle présente des améliorations importantes. L'ouvrage original, rédigé et imprimé en quelques mois à peine, ne pouvait manquer de se ressentir d'une telle précipitation ; aussi les quelques petites inexactitudes qui s'y étaient glissées ont été corrigées, et quelques passages un peu obscurs rendus plus clairs.

En outre, dans ces cinq années, la science a avancé assez rapidement. Nous sommes heureux de constater qu'aucune des doctrines fondamentales énoncées dans cet ouvrage n'a été ébranlée par les récentes découvertes, et qu'au contraire un grand nombre de détails ont été confirmés et élucidés d'une manière remarquable, et se trouvent appuyés sur des preuves nouvelles. Nous avons donc profité de ces progrès, et on trouvera consignées à leur place les données nouvelles acquises à la science.

Cependant nous n'avons pas voulu changer la forme de l'ou-

vrage; au contraire, nous avons cherché à conserver son originalité. Il y avait pour cela une excellente raison : en effet, dans cet intervalle, bien des professeurs et des vulgarisateurs habiles ont cherché à répandre ces doctrines, soit par des articles, soit par des ouvrages spéciaux. En modifiant trop notre rédaction, nous aurions couru le risque de paraître avoir emprunté à ceux que nous avions réellement précédés et qui quelquefois même nous ont simplement copiés.

L'ouvrage ayant été écrit dans le but spécial d'exposer les doctrines de la physique moderne, il n'a pas la prétention de faire connaître les détails particuliers de la science, et surtout ceux qui tiennent à la partie pratique et technique. Cependant nous avons développé davantage la théorie de la chaleur pour préparer suffisamment le lecteur à l'étude des ouvrages spéciaux où il pourra trouver les renseignements intéressants sur cette branche. Enfin de nouvelles figures propres à éclairer le lecteur ont été ajoutées, et rendront plus saisissables certains phénomènes.

Si l'on compare le langage actuel des savants à celui qui était en usage il y a cinq ans, on trouvera de grandes différences : certaines idées émises pour la première fois dans ce livre, et regardées comme prématurées à l'époque où parut la précédente édition, sont acceptées aujourd'hui, et sont même devenues vulgaires. Qu'il nous suffise de citer la rotaton atomique, la relation des pouvoirs optiques et électriques des corps, l'influence des pressions latérales des fluide étendue à l'électricité, l'assimilation du courant électrique à un flux d'éther, la théorie de l'induction électro-dynamique, etc.

Nous sommes loin de croire que les savants aient été amenés à ces idées nouvelles par la lecture de notre livre ; mais elles leur ont été imposées par l'observation des faits ; nous n'avons qu'à nous féliciter d'être arrivé aux mêmes conclusions par une voie plus courte.

Trois ordres de phénomènes principaux constituent les mani-

festations des forces physiques analysées dans cet ouvrage, ce sont : la chaleur, les radiations et l'électricité. La théorie de la chaleur est déjà constituée sur des bases solides. Depuis la publication de notre essai en 1864, l'étude de la radiation a fait de grands progrès, néanmoins l'obscurité qui enveloppait jadis la manière d'agir des vibrations transversales persiste encore aujourd'hui. Le raisonnement nous conduit là à des conclusions irrécusables, mais dont l'imagination ne peut pas encore saisir clairement le mécanisme. Sans nuire à la science, ces difficultés jettent une certaine inquiétude dans l'esprit du savant, qui se trouve pour ainsi dire arrêté dans son essor.

En électricité, les complications sont encore plus grandes. L'observation nous montre des relations frappantes et concluantes entre les phénomènes statiques et dynamiques, et de nombreuses analogies entre ceux-ci et les mouvements des fluides ; mais lorsqu'on vient aux détails, on rencontre des difficultés sérieuses à concevoir le mécanisme des phénomènes qui reste ainsi comme enveloppé de mystère.

Ce sont surtout ces difficultés que nous nous sommes efforcés de vaincre : y sommes-nous parvenus ? Le lecteur en jugera. Nous avons au moins indiqué aux chercheurs les points dignes de leur attention, et dans quel sens ils doivent interroger la nature. Si les physiciens expérimentateurs dirigent convenablement leurs travaux vers l'étude des inductions électro-dynamiques, la science ne tardera pas à se débarrasser de ces incertitudes. Nous avons essayé d'indiquer cette route en réunissant dans la présente édition un nombre plus considérable de phénomènes dus au mouvement des fluides propres à éclaircir la théorie électro-dynamique. Ainsi nous avons essayé de frayer la voie que d'autres plus heureux parcourront plus avant.

Comme le goût des études théoriques se développe chaque jour davantage, on est en droit d'espérer que les lacunes ne resteront pas longtemps sans être comblées. Le meilleur moyen pour arriver plus rapidement à ce résultat, est de commencer

à introduire dans l'enseignement élémentaire une coordination systématique et régulière des phénomènes, laissant de côté l'ordre historique des découvertes qui jusqu'ici a fourni le plan de presque tous les traités spéciaux[1].

On nous a reproché d'avoir suivi de trop près dans notre ouvrage le genre d'exposition qui convient à un précis élémentaire de physique. Je crois ce reproche peu fondé. Les détails dans lesquels nous sommes entrés étaient nécessaires, car les faits particuliers sont la pierre de touche des théories.

En effet, quiconque embrasse les phénomènes de la nature dans une généralisation un peu élevée, est porté à voir tous les faits concorder de la manière la plus heureuse avec les idées systématiques qui le guident. Ainsi quand les nuages sont amoncelés à l'horizon, leurs masses bizarrement groupées paraissent à quelques-uns dessiner la figure d'un énorme géant, alors que d'autres y retrouvent la riche ordonnance d'un palais fantastique. Mais agir de la sorte ce n'est pas faire avancer la science, au contraire c'est nuire à son progrès.

Du reste, si l'on croit utile d'introduire notre système dans l'enseignement classique, assurément les détails dans lesquels nous sommes entré ne sont pas inutiles, et même on reconnaîtra bien vite que sous ce rapport notre livre est incomplet.

Nous le répétons : les détails n'ont d'autre but que de donner ou les éléments ou la contre-épreuve des théories, et si dans quelques chapitres le lecteur les trouvait surabondants, il pourra très-bien les laisser de côté.

Un mot sur la traduction. Le style italien, surtout celui de la discussion scientifique, est fort différent du style français : de là une difficulté considérable dont seul peut se rendre compte celui qui en a fait l'essai ; aussi s'est-on appliqué principalement à rendre d'une manière rigoureuse la pensée de l'auteur, même parfois au détriment de la forme et de l'élégance de l'ex-

[1] Dernièrement M. Jamin est entré dans cette voie par son *Petit traité de Physique*, et M. Cantoni par son *Corso di Fisica*. (Note du 12 février 1874.)

position. L'édition française de l'*Unité des forces physiques* n'a pas la prétention d'être une œuvre de littérature scientifique, résultat auquel il est toujours bien difficile d'arriver en traduisant un ouvrage du genre de celui-ci et surtout lorsqu'il est écrit en italien. Nous espérons cependant que la lecture de ce livre, qui, pour certains passages, a dû exiger un grand travail et une parfaite intelligence du sujet de la part de notre traducteur, paraîtra facile; il n'a reculé devant aucune espèce de difficulté pour conserver le sens exact de l'original, en s'efforçant toujours le plus possible de se conformer aux exigences de la belle langue française.

A. SECCHI.

Rome, ce 28 février 1869.

INTRODUCTION

DE LA PREMIÈRE ÉDITION FRANÇAISE

La science dont le but est la connaissance des forces physiques régissant l'Univers est entrée depuis ces dernières années dans une nouvelle phase, quant à sa manière d'envisager les phénomènes de la matière inorganique. Comme elle s'est montrée féconde en utiles applications, de toutes parts elle a été cultivée avec ardeur ; aussi a-t-elle progressé à pas de géant. Les méthodes scientifiques, l'expérience et l'observation sont devenues des puissances ; franchissant l'enceinte étroite du laboratoire des savants, elles ont été mises en œuvre par de riches sociétés industrielles et par les gouvernements éclairés. Ainsi il a été possible de vérifier sur une vaste échelle les conséquences tirées par les hommes d'étude de leurs spéculations théoriques et d'étendre le champ de l'expérimentation.

L'emploi de la vapeur dans les machines motrices, de l'électricité dans la télégraphie et la métallurgie, les applications de la chimie à l'industrie et aux arts usuels, ont provoqué une série de recherches qui ont éclairé la théorie de la constitution des corps d'un jour tout nouveau. De nombreuses opinions, acceptées généralement jusqu'ici, sont abandonnées ; un lien inattendu a été trouvé entre les divers agents de la nature, que l'on croyait indépendants les uns des autres, et on a entrevu une voie nouvelle qui peut conduire à la solution du grand pro-

blème, c'est-à-dire à la connaissance des forces régissant la matière.

Depuis longtemps les forces ont été classées et réduites à un petit nombre : chaleur, lumière, électricité, magnétisme, attractions moléculaires, affinités chimiques, gravitation universelle, sont les divers principes à nous connus qui expliquent tous les phénomènes de la matière. Quelle est la nature de ces agents? Le problème, pendant longtemps mystérieux ou mal compris, est aujourd'hui envisagé sous un aspect nouveau et se simplifie d'une manière admirable. Pour la physique moderne, les forces sont des modes de mouvement. D'après les nouvelles théories, une substance impondérable, impalpable, incoercible, répandue partout, nommée éther, occupe l'univers, et détermine tous les phénomènes dont nous avons parlé, en agissant d'une façon purement mécanique. Mais de quelle manière se produisent ces phénomènes? Quel lien existe entre ces manifestations en apparence si diverses? Seuls, les faits bien observés et bien coordonnés nous peuvent éclairer dans cette discussion difficile, et toute théorie qui aspire à se formuler doit être précédée par un exposé et une revue méthodique des données fournies par l'expérience. Après avoir accompli ce travail et seulement alors, on peut recourir au raisonnement et aux hypothèses afin de combler les lacunes qu'auront laissées l'observation et l'expérimentation.

Coordonner le nombre immense des phénomènes par lesquels se manifestent à nous les forces de la nature, en montrer les liaisons mutuelles, c'est là ce que j'ai tenté de faire dans ces pages, spécialement destinées à la jeunesse studieuse. Toutefois la lecture de notre travail sera peut-être d'une certaine utilité à ceux qui déjà connaissent la science ; car en sériant les faits connus, en les présentant sous un point de vue convenable, et en rapprochant ainsi les diverses parties de nos connaissances, de nouveaux horizons se découvrent et les vérités s'éclairent les unes par les autres. Je me suis efforcé autant que

possible de ne pas introduire mes opinions personnelles dans la discussion, et je ne m'y suis décidé que là où certains desiderata m'autorisaient à apporter quelques compléments aux travaux des autres. Puissent mes efforts ne pas être jugés téméraires.

Réduire toutes les forces de la nature à un principe unique, voilà l'expression de la tendance scientifique de l'époque. Mais avouons que jusqu'à présent le chemin n'est pas encore complétement frayé ; il présente de grandes lacunes : heureux celui qui saura les combler !

Un savant distingué a essayé la synthèse physique, en excluant toute cause autre que la matière pondérable. Pour moi, je tente une voie différente. Le lecteur appréciera de quel côté est la vérité. On reconnaîtra facilement que la différence entre les deux théories n'est pas aussi grande qu'elle paraît à première vue, et laissant de côté les points secondaires encore douteux, je suis convaincu qu'en cherchant à réunir les parties déjà achevées de ce grand édifice, on arrivera plus facilement à son couronnement. Jusqu'à présent les savants modernes ont tenu en faible estime les travaux de ce genre : aux yeux de la plupart d'entre eux, colliger les faits, vaut mieux que tenter une synthèse scientifique. Disons toutefois que la réaction contre cet éloignement systématique s'accuse chaque jour davantage. Il devait en être ainsi, car, de même qu'on jugerait absurde un homme qui sans cesse rassemblerait des matériaux sans jamais penser à édifier, aussi la connaissance de la constitution de l'univers et de ses lois étant l'unique objet de la science, les savants feraient fausse route si, bornant leurs efforts à accumuler des observations, ils ne jetaient de temps en temps un coup d'œil rétrospectif sur les connaissances déjà acquises, au moins pour savoir quelles sont les parties faibles de l'édifice scientifique, et quels problèmes réclament leurs travaux. De cette manière, on prépare à la génération future une route qui la conduira à des connaissances dont la découverte nous est peut-être impossible

aujourd'hui. Tel est l'unique objet de ce travail, et je serai le premier à applaudir celui qui traitera ce sujet plus heureusement qu'il ne m'a été permis de le faire moi-même. Jusque-là je dirai :

... Si quid novisti rectius istis,
Candidus imperti, si non, his utere mecum.
(HORACE.)

INTRODUCTION

A LA PRÉSENTE ÉDITION

L'ouvrage que je présente de nouveau au lecteur n'avait pas été écrit tout d'abord avec l'espérance du succès qu'il a obtenu. Ce livre avait seulement pour but de faire connaître l'état de la science physique et en même temps de défendre les idées que j'avais exposées dans d'autres opuscules antérieurs. Son remarquable succès, tout en justifiant d'une manière éclatante les idées nouvelles, eut en outre ce résultat inespéré de contribuer à leur diffusion; et cela avec une telle rapidité que, tandis qu'à l'époque de la publication de notre travail, les rares défenseurs des nouvelles doctrines osaient à peine élever la voix, aujourd'hui ces théories sont acceptées même dans l'enseignement élémentaire.

Loin de nous la prétention de croire que notre livre a déterminé un tel mouvement d'idées par sa valeur intrinsèque ; il fut seulement la graine qui, mûre à point et tombant dans un terrain bien préparé, germe et fructifie promptement.

Si nous prétendions à plus, nous courrions le risque d'être taxé d'illusions. Les progrès de la science étaient déjà assez considérables pour qu'il fût impossible de persévérer dans les anciennes idées, et il suffisait d'en signaler les inconvénients, en embrassant la physique dans un coup d'œil synthétique;

pour faire abandonner à tout jamais les anciens errements. Ainsi s'explique le succès du livre, non-seulement en Italie, mais aussi à l'étranger, et comment deux éditions, l'une italienne l'autre française, furent rapidement épuisées.

Les dix années qui se sont écoulées depuis notre première édition n'ont rien ajouté de bien nouveau aux principes qui étaient établis à l'époque où elle a paru ; mais, par contre, elles ont été signalées par de remarquables progrès dans le mode d'exposition, et dans la vulgarisation des principes.

Aussi, mettant cette circonstance à profit, je me suis appliqué à traiter avec détails les plus récentes découvertes et à abréger, en quelques points du texte primitif, des développements aujourd'hui inutiles; à corriger enfin, çà et là, quelques inexactitudes inévitables dans un travail aussi étendu. Avant tout je crois nécessaire d'ajouter ici brièvement l'exposition de quelques considéralitions générales afin d'empêcher, de la part de lecteurs non suffisamment préparés, un jugement erroné sur l'objet et le but de ce livre. Cela fait on ne sera pas exposé à chercher dans ces pages ce qu'elles ne renferment pas et le lecteur ne sera ni fourvoyé ni trompé.

La présente introduction sera donc consacrée à l'examen préliminaire de certains principes généraux, de cette façon l'exposition des faits et des théories spéciales ne souffrira aucune interruption dans le courant de l'ouvrage.

Ce livre a pour but de montrer comment les phénomènes de la physique peuvent rentrer dans les lois générales du mouvement de la matière; en admettant, avec preuves à l'appui, que, outre la matière commune dite pondérable, il existe une autre matière invisible et non soumise à la gravité nommée éther ou impondérable.

Cette idée, avons-nous déjà dit, a fait de grands progrès dans ces dernières années ; mais, tout en reconnaissant le chemin

qu'elle a parcouru, il faut néanmoins avouer que nous sommes arrivés à une de ces périodes scientifiques que l'on peut très-exactement comparer aux phases d'un mouvement oscillatoire. Là, nous voyons le mobile passer d'un extrême à un autre avant de s'arrêter dans la position d'équilibre. De même, tandis qu'il y a quelques années à peine, on admettait sans difficultés l'existence d'une demi-douzaine de fluides impondérables, aujourd'hui au contraire on rejette tous les agents qui ne sont pas la pure matière pondérable.

Non-seulement les phénomènes lumineux seraient propagés par la matière pondérable diffusée dans l'espace, mais certains vont plus loin encore et ne répugnent pas à dire que « *pour expliquer la lumière il n'est pas nécessaire d'admettre autre chose qu'une oscillation périodique entre deux états en un point donné de l'espace*[1]. Cette conception est tellement claire que l'auteur lui-même se hâte d'ajouter : « *Quels sont ces deux états? Personne ne le sait, mais certainement ce ne sont pas des états de déplacement purement mécaniques*. » Par leur excès même de telles erreurs devaient disparaître promptement entraînées par une réaction inévitable. Toutefois il est pénible de voir à quel point les conquêtes de la science qui ont coûté de si grands sacrifices sont délaissées pour de vaines fantaisies de l'imagination.

Du côté de l'électricité le progrès est plus sérieux ; là on a voulu tout ramener au mouvement de la pure matière pesante. Non-seulement on a rejeté l'électricité en tant que fluide *sui generis*, mais encore on a banni l'hypothèse de l'éther de ce dernier refuge ; hypothèse qui, dans notre théorie, suffisait à expliquer les phénomènes de cette classe. Malheureusement ici encore on a rencontré un écueil sérieux dans l'explication des actions exercées à distance par les aimants et les conducteurs traversés par des courants, actions qui se comprennent mal

[1] Paroles de M. W. K. Clifford dans une Conférence faite à l'Institution royale de Londres, en 1867, et citées par Bence Jones dans la *Revue des cours scientifiques*, 8e année, p. 6, col. 1.

quand on les regarde comme de simples effets de la matière pesante.

Pour tourner cette difficulté les uns ont eu recours à la théorie de la polarité, c'est-à-dire sont revenus aux hypothèses émises anciennement par Faraday et par Berzelius pour expliquer ces mêmes phénomènes. De cette façon, en adoptant comme principe de toutes les actions cette *polarité* de nature inconnue et non définie, la science n'a plus qu'à grouper autour de cette notion fondamentale tous les phénomènes, tant les actions électro-dynamiques que les actions électro-statiques.

Mais alors on ne fait en réalité que reculer la difficulté sans la résoudre. Car, vient-on à demander en quoi consiste la polarité et comment elle agit à distance à travers les corps, on est forcé de répondre que c'est une force primitive *sui generis* de laquelle il ne faut chercher la nature pas plus qu'on ne le fait pour la gravité.

Nous ne sommes pas certainement de ceux auxquels il répugne de grouper les phénomènes autour d'une classe de forces; mais si cette force reste un mystère alors autant vaut les remplacer par des fluides, car ceux-ci, encore bien qu'ils soient hypothétiques, ont au moins le mérite d'être plus compréhensibles et de se prêter plus simplement à la systématisation des phénomènes. La théorie de la polarité ayant rencontré des défenseurs en Italie, nous la discuterons dans cette édition plus à fond que nous l'avions fait dans les précédentes.

Depuis la publication de la seconde édition de notre livre, une autre question relevant de la théorie pure est devenue l'objet de discussions passionnées. On s'est demandé si la matière est, oui ou non, séparable de la force. En thèse générale cette question est réellement d'ordre métaphysique et dès lors, hors de notre sujet, de sorte que nous pourrions l'éluder. Toutefois, comme elle intervient souvent de façon à jeter de l'obscurité sur des sujets très-clairs en eux-mêmes, nous en dirons quelques mots.

Que la matière soit dans l'acception la plus générale du mot inséparable de quelque force cela est indubitable, parce que la notion élémentaire de la matérialité comprenant au moins l'impénétrabilité et la résistance d'inertie, ces propriétés ne peuvent se trouver en un point de l'espace (que nous disons alors occupé par la matière), sans que ces points aient une force quelconque en prenant ce mot avec sa signification la plus étendue. Par conséquent, à un certain point de vue, la force est inséparable de la matière.

Dans le cas des forces physiques que nous aurons à examiner il n'est pas nécessaire de remonter à ces notions premières. Nous prendrons cet être que l'on nomme matière et qui forme les corps telle que l'expérience nous la donne ; et, par activité ou force, nous nommerons seulement la faculté de produire certains effets extérieurs, tels que élévation de température, production de lumière, attraction ou répulsion ; puis nous chercherons comment ces effets peuvent se réduire à ces mêmes effets mécaniques que nous connaissons dans les masses limitées et pondérables, c'est-à-dire que nous nous demanderons s'ils peuvent être causés par des vibrations, des pressions, des effluves, etc. De la sorte la question métaphysique ne nous touche en rien, et qui a regardé notre livre comme incomplet parce qu'il ne répondait pas à ces questions, s'est mépris, puisque nous avons fait un traité de physique et non de métaphysique. S'il nous est arrivé parfois de dire quelques mots sur ce sujet, cela a toujours été incidemment, et parce qu'il est difficile de faire autrement à cause des rapports très-étroits qui unissent les recherches physiques à celles de la métaphysique.

Mais la question a été résolue, par un grand nombre, d'une toute autre manière. On a admis que la matière était intrinsèquement active, et douée de forces propres, spéciales, agissantes, et qui lui sont tellement inhérentes qu'elle ne peut en être séparée ; et, par suite, on a confondu ensemble plusieurs choses

qu'il est bon de distinguer les unes des autres. Par exemple, il a été dit que la gravité est une propriété des atomes matériels aussi inaltérables que l'action chimique, laquelle est en effet inséparable de l'atome dans le sens absolu du mot, car on ne pourrait la supprimer dans l'atome sans détruire les sens de ce dernier, ainsi on ne saurait enlever à l'oxygène ses propriétés sans qu'il cesse d'être l'oxygène.

A notre avis, la comparaison est inexacte, et on a fait confusion. L'oxygène ne peut être privé de ses propriétés sans cesser d'être l'oxygène, cela est vrai ; de même que les lettres de la présente page de ce livre ne peuvent être changées de place, sans que cette page cesse d'être elle-même ; toutefois les lettres elles-mêmes peuvent subsister et rester, comme caractères isolés, ou au contraire être employées à représenter d'autres idées. De même si l'oxygène est composé de plusieurs atomes (et aujourd'hui on le croit plus que jamais), ceux-ci disposés autrement auront d'autres rapports avec les autres corps, mais subsisteront comme matière et seront encore susceptibles de forces attractives, etc. La gravité au contraire est une force qui ne résulte que de la réunion d'un grand nombre de molécules unies ensemble, et si, dans le monde, il n'existait qu'un seul atome matériel, il ne serait pas pesant parce qu'il ne tendrait vers aucun autre. On pourra dire, à la vérité, que cet atome serait pesant en puissance, parce qu'il pourrait attirer ou être attiré, mais cette assertion suppose ce qui est en question, c'est-à-dire que la gravité est inséparable de la matière ; et il faudrait le démontrer par un autre moyen et d'une manière absolue, ce qui n'a pas encore été fait.

Nombre de physiciens voyant qu'il est démontré aujourd'hui que les forces se réduisent au mouvement ou tout au moins y sont réductibles, poussent cette idée à ses dernières conséquences et admettent le mouvement comme étant de nécessité absolue. Dans cette hypothèse encore on confond deux choses parfaitement distinctes, savoir la constance de la loi que nous

trouvons expérimentalement dans la matière (c'est-à-dire que la matière est toujours en mouvement), avec sa nécessité absolue et indispensable, de telle sorte que, suivant les défenseurs de cette manière de voir, nous ne pourrions jamais supposer un atome en repos. L'absurdité d'une pareille hypothèse devient manifeste, en voyant les efforts faits inutilement par les philosophes pour démontrer *a priori* les lois du mouvement et de sa communication. Ces lois sont certaines, sont immuables, elles sont la base de toute notre science, cela est vrai et indiscutable, mais cela ne prouve pas qu'elles ne pourraient pas avoir été établies d'une autre manière par l'Auteur des choses. La conservation de l'énergie de la force, et des mouvements dans leurs modalités les plus diverses est une loi invariable soit, mais elle est une loi libre, une loi qui pourrait ne pas être, et *avec cela on ne détruit pas la science* comme l'a prétendu quelqu'un, parce que notre science se réduit à savoir prévoir les phénomènes futurs à l'aide de la loi déduite des faits précédents. Or, à une telle prévision suffit évidemment la *constance* de la loi, et peu importe que la loi elle-même soit de *nécessité absolue*, ou de *nécessité relative* à une détermination librement prise par l'Auteur de la loi.

D'autres confondent l'impondérable avec la force et croient que la force est un être existant de soi, qui reste en quantité absolument invariable, de même que toujours suivant eux, cela est pour la matière. Cette hypothèse a un côté physi que et un côté métaphysique. Sous ce dernier rapport, de même que la quantité de matière n'est pas absolument invariable, parce que la puissance divine pourrait en former encore par création ; de même aussi, la somme des énergies et des forces pourrait être augmentée par la *cause première* elle-même. Supposer le contraire, c'est admettre ce principe évidemment faux que tout ce qui existe, existe par nécessité absolue, et qu'il n'y a rien autre chose dans ce monde que la matière, et que cette matière est animée d'un mouvement éternel et inaltérable ; idées dont

la fausseté est parfaitement démontrée par ceux à qui il revient de le faire.

D'autre part, au point de vue physique, confondre l'impondérable avec la force, est une absurdité parfaite. En effet, qui dit impondérable, dit seulement une substance qui par sa disposition atomique n'est pas assujettie à tomber ou à être attirée vers une autre masse, et de la sorte on ne dit pas évidemment *force*. Par suite, c'est taxer gratuitement d'absurdité les doctrines que nous défendons. Assurément, celui qui pense que la gravité est inséparable de la matière, voyant l'impossibilité d'expliquer certains faits sans un *quid* qui remplisse l'espace, et ne voulant admettre la matière autrement que pesante, la mettra au nombre des forces, c'est-à-dire, en fera un être idéal. Mais ces conséquences ne sont pas nécessaires, nous ne les admettrons pas, et nous n'établissons pas les principes desquels on puisse les déduire logiquement! Pour nous, l'éther est bien un être matériel, mais non soumis à la gravité, parce que peut-être il est lui-même la cause de celle-ci.

Si la matière d'une façon générale est pratiquement inséparable du mouvement dans lequel consiste sa force, mieux encore la force est inséparable de la matière. Or, pour nous restreindre au cas des phénomènes physiques, réductibles au mouvement, comme il est évident que l'on ne peut obtenir le mouvement sans quelque chose qui soit en mouvement, lorsqu'on regarde la force comme un être existant par lui-même, si par là on n'entend pas la substance divine, nous avouons ne pas comprendre comment on peut comprendre la chose autrement.

Du reste, de ce que la matière et la force sont incessamment unies, il ne s'ensuit pas que par abstraction nous ne puissions parler de l'une et de l'autre comme séparables par la pensée; de même que le géomètre traite des lignes et des surfaces qui assurément ne sont pas séparables des corps. Nous ne nous proposons pas ici de considérer les deux choses comme réellement séparables, ni de définir la consti-

tution intime de la matière. La question pour nous n'est point là, comme quelqu'un a voulu le faire supposer. Nous *cherchons seulement à expliquer à l'aide des mouvements que l'on observe dans les masses visibles et palpables, les phénomènes qui échappent à nos sens, soit en raison de la petitesse des masses, soit parce que le milieu dans lequel ils s'accomplissent, échappe lui-même à notre perception sensorielle.* Répétons-le donc (et ce ne sera jamais trop). Nous nous tiendrons dans le domaine des phénomènes physiques, et nous laisserons de côté ceux d'ordre métaphysique. Entre le genre de faits que nous examinerons et la constitution première de la matière, existe un abîme que jusqu'à présent il n'est pas permis de franchir. Et pour revenir à une comparaison déjà citée, mais qui, à notre avis, peut être plus développée que ne l'a fait Boscovich, son auteur, nous dirons que les corps peuvent être comparés à des édifices contenant des bibliothèques remplies de livres imprimés avec des caractères extrêmement variés, et traitant des sujets les plus divers, et dont les lettres sont faites avec une infinité de points tellement petits que les plus puissants microscopes permettent à peine de les distinguer.

La science actuelle n'a pas la prétention de lire ces livres, et jusqu'ici elle aspire seulement à pouvoir distinguer un volume d'un autre ; à plus forte raison ne prétend-elle pas lire les mots et distinguer les caractères, et de longtemps elle n'espère parvenir à séparer les points qui forment ces derniers.

Je ne dirai rien de ceux qui croient la matière douée d'une activité telle qu'elle peut par elle seule donner naissance à des êtres organisés, sensitifs, et finalement à la pensée. Nous ne les suivrons pas sur ce terrain, car il n'est pas le nôtre. Dépourvus de toutes preuves positives pour appuyer leurs fantastiques théories, ils exagèrent encore les conséquences de ces doctrines, en tirant des conclusions de prémisses qui ne les renferment pas. D'autres, non moins à tort, déclarent sur tous les tons, que la doctrine de l'unité des forces physiques conduit inévita-

blement au matérialisme, et qu'elle est un des plus solides arguments en faveur de ces romanesques hypothèses. Nous répondrons à ces objections en temps opportun, et nous montrerons comment ces auteurs restent toujours dans l'équivoque et dans une fausse interprétation des phénomènes physiques.

L'étude de ces aberrations chez plusieurs auteurs contemporains, du reste fort respectables, et la critique que nous en avons faite, nous a convaincu que la majeure partie des difficultés qui obstruent la route dans les études de ce genre, résultent de la confusion qui jusqu'à présent règne dans la nomenclature scientifique. A chaque instant, nous sommes forcé d'employer le mot Force pour exprimer les causes de phénomènes très-différents les uns des autres, et produits par des causes extrêmement dissemblables, et il n'y a peut-être pas un mot qui ait un nombre d'acceptions aussi considérable, et qui prête davantage aux abus de signification et à l'équivoque. Nous croyons donc qu'il sera bon avant d'entrer en matière, de préciser le sens de cette expression, et d'indiquer quel usage on en doit faire.

II

L'idée de *force* nous est acquise par le sens intime, à la suite des manœuvres que nous faisons pour mettre en mouvement les corps environnants, et même les membres de notre corps. L'expérience nous apprenant, en effet, que tout mouvement du corps est précédé par un effort exécuté par nous-mêmes ou par d'autres, nous étendons ce principe et nous disons que tout mouvement est produit par une *force* analogue à la cause qui engendre en nous l'effort accompli pour mouvoir les corps. Chez les anciens, on le sait, cette induction était poussée à un tel point que, suivant eux, les corps célestes étaient entraînés dans leurs orbites par des intelligences.

Les mouvements que nous pouvons observer s'accomplissent dans deux conditions. Les uns ont lieu dans un espace libre

en quelque sorte (au moins sensiblement), et ne rencontrent pas de résistance appréciable, tels sont les mouvements planétaires, le mouvement des projectiles dans le vide, etc.; les autres, au contraire, ne se produisent qu'en surmontant des résistances. Les premiers, le plus souvent, résultent de l'action de cause ayant une très-courte durée; on les dit engendrés par des forces instantanées. Cette expression est inexacte, car un mouvement fini ne peut prendre naissance dans un *instant*, ce mot étant pris dans son acception rigoureuse, c'est-à-dire pour représenter un temps nul; il exige toujours un temps déterminé, mais qui peut être très-court. Toutefois, nous ne repousserons pas l'expression dès l'instant où sa signification est nettement précisée, et faute de meilleure, on peut continuer à l'employer. Dans le cas considéré, la cause ou la force qui produit le mouvement, abandonne réellement le mobile, et ce dernier pendant son trajet n'est plus soumis à l'action de la force. Par conséquent, il est inexact de dire, par exemple, que les corps célestes sont animés par deux forces, une instantanée, l'autre de gravitation. La première exista un temps, à l'origine du mouvement, mais dans la suite elle n'exista plus ; de cette force, il ne subsiste que l'effet, c'est-à-dire l'impulsion, laquelle se conserve seulement en raison de l'inertie de la matière.

L'*inertie* a été à tort considérée comme une force, elle n'est que l'incapacité de la matière de changer par elle-même un état quelconque dans lequel elle se trouve. Un corps est-il en repos, il y restera éternellement à moins qu'une cause ne vienne l'en faire sortir; est-il en mouvement, il persistera éternellement dans son mouvement jusqu'à ce qu'une cause étrangère l'arrête.

On peut arriver encore à cette conclusion par le raisonnement métaphysique suivant :

Le mouvement n'est autre que l'existence successive du corps dans divers points de l'espace ; or, de sa nature (c'est-à-

dire là où d'autres causes déterminatrices n'existent pas), l'espace est homogène, par conséquent, il ne peut y avoir de raison pour laquelle un corps se tienne dans un point plutôt que dans un autre, donc de sa nature il doit être indifférent à tel ou tel lieu et par suite inerte. En outre, un corps qui est en mouvement par rapport à un point donné, peut être en repos par rapport à un autre point. De sorte qu'arrêter le corps relativement au premier point, serait le mettre en mouvement relativement au second ; par conséquent, il ne peut rien y avoir d'absolu en cela.

Mais ceux qui nomment l'inertie une force, le font en se plaçant à un autre point de vue. Lorsqu'on veut mettre un corps en mouvement ou au contraire l'arrêter, on éprouve une certaine résistance, parce que, disent-ils, il faut *vaincre l'inertie ;* par suite, ils nomment l'inertie une force. Le fait est vrai et l'explication est juste. Pour mettre un corps en mouvement alors même qu'il est complétement libre de tout obstacle, une force est nécessaire : une bille posée sur un plan poli avec une perfection mathématique oppose, quand elle se met en mouvement, une certaine résistance causée seulement par son inertie. Mais de là, il ne résulte pas que l'on doive considérer cette réaction du corps comme une véritable force. Cette résistance naît simplement de ce qu'en principe un effort est nécessaire de la part de la cause agissante pour mettre en mouvement un corps ; et que cet effort s'exerce et se continue jusqu'à ce que la vitesse du corps mis en mouvement soit égale à celle du corps moteur. Arrivés à ce degré de vitesse, les deux corps se mouvront ensemble s'ils ne sont pas élastiques ; et s'ils sont élastiques, le corps moteur restera en arrière plus ou moins suivant le degré d'élasticité, et le mobile s'avancera en s'éloignant du premier. On fait donc confusion entre la véritable inertie et celle que l'on doit nommer plus exactement *réaction*, éprouvée par le corps moteur et produite en raison de sa propre inertie par le corps mis en mouvement. Cette réaction est la cause

pour laquelle le premier corps perd de son mouvement une quantité précisément égale à celle qu'acquiert le second ; ainsi que l'indique la loi énoncée par Newton lorsqu'il posait comme principe que *à toute action correspond une réaction égale et contraire*.

La communication du mouvement même dans les corps libres ne se fait jamais d'une façon instantanée dans la véritable acception du mot ainsi que nous l'avons déjà dit. Cette communication se fait réellement en un temps très-court, car le mouvement doit nécessairement passer par degrés successifs de vitesse de zéro à la valeur définitive que nous avons dit avoir pour limite maximum la vitesse du corps moteur.

Les mouvements de la seconde classe sont ceux qui pour se produire exigent que certains obstacles plus ou moins apparents et sensibles soient surmontés. Exemple, le mouvement d'un chariot sur un pavé raboteux, dans lequel la résistance opposée par les inégalités du sol devant être surmontée à chaque instant, une impulsion de très-courte durée (instantanée) serait promptement épuisée ; aussi ce mouvement exige l'action d'une force *continue*. Ce genre de force produit ordinairement ce que en langage vulgaire on nomme un *travail*, expression qui dans son acception scientifique s'étend à tout genre d'opération, dans laquelle une force *fait parcourir un certain espace en surmontant une résistance*. Chacun connaît les travaux mécaniques d'une scie qui rompt la cohésion d'un corps compacte, d'un bateau traîné sur un canal, et une infinité d'autres. Dans tous ces exemples, il est facile de retrouver l'espace parcouru par le mobile et la résistance vaincue.

Mais l'obstacle n'est pas toujours aussi apparent que dans les cas précédents ; quelquefois il est invisible. Tel est le cas qui se présente à chaque instant, lorsqu'on soulève un poids : on surmonte alors la force de sa gravité, obstacle invisible mais non moins réel pour cela. Ce travail, en raison de son invisibilité, peut être comparé à celui que ferait un homme

soulevant le piston d'une machine pneumatique afin de faire le vide dans le récipient. Cet homme éprouve une résistance puisqu'il doit soulever non-seulement le piston, mais encore le poids de la colonne d'air qui pèse sur la face supérieure du piston. Cette colonne d'air est invisible, mais néanmoins parfaitement réelle, et oppose un obstacle au mouvement d'ascension.

De même, quand nous soulevons tout autre poids, nous devons éprouver une fatigue, exercer un travail pour vaincre la gravité. Nous ignorons jusqu'ici en quoi consiste cette force, mais elle agit de même que si tous les corps étaient attirés par la terre, ou mieux poussés vers elle avec un certain effort qui, à volume égal, n'est pas le même pour tous.

Ce travail étant un phénomène général perçu par tout le genre humain, et comparable dans les divers pays, sert de mesure naturelle pour évaluer les autres travaux, ainsi que nous le dirons plus loin.

Le travail dont nous nous occupons en ce moment, nous fait acquérir une notion nouvelle ; nous reconnaissons, en effet, que pour soulever un volume de dimensions données, par exemple, un décimètre cube, l'effort nécessaire n'est pas le même pour tous les corps. Ainsi le plomb exige un effort plus grand que celui nécessaire pour l'eau, etc., de là l'idée du *poids* et de la *masse*.

Ces deux choses confondues pendant longtemps n'ont été bien comprises qu'au temps de Galilée. On croyait, avant ce physicien, que la gravité était une force spéciale à chaque corps, et qu'il y avait, pour ainsi dire, autant de forces de gravité différentes qu'il y avait de substances n'ayant pas le même poids sous le même volume. Cette opinion paraissait confirmée par ce fait que les corps dits plus pesants tombaient plus rapidement vers le sol. Galilée démontra le contraire, et établit que la gravité, c'est-à-dire la vitesse imprimée aux corps par la gravité dans un temps déterminé est la même pour tous, et que les poids seuls sont différents suivant la *masse* de ces corps.

Si nous voulons avoir une idée nette de ces choses, reportons-nous un instant à la mesure des forces que nous avons dit être inexactement nommées instantanées.

Nous pouvons imaginer deux forces de cette espèce imprimant une égale vitesse à deux corps, A et B égaux *en tout;* ces deux forces pour nous, sont égales. Si nous trouvons une force qui, agissant sur un des deux corps, lui communique une vitesse double ou triple, etc., de la première, nous dirons que cette force est double, triple, etc., de la précédente ; d'où : les *forces sont proportionnelles aux vitesses.*

Imaginons un autre cas et supposons que la force double, triple, etc.; ainsi déterminée, agisse sur un troisième corps C différant de A, de telle sorte, qu'au lieu de recevoir une vitesse double de celle que la première force avait imprimée à A, il reçoive une vitesse égale. Nous dirons alors que le corps C renferme plus de matière, ou qu'il a une plus grande masse, et nous regarderons cette masse comme étant exactement le double de celle de A. Nous dirons donc d'une manière générale, qu'un corps a une masse double, triple, etc., de celle d'un autre quand le premier exige pour être mû avec une certaine vitesse une force double, triple, etc. de celle nécessaire pour imprimer une vitesse égale au poids pris comme unité.

C'est-à-dire, en langage technique, que les forces sont proportionnelles aux masses; par conséquent, d'une manière générale les forces s'estiment en raison composée de la masse du corps mis en mouvement et de la vitesse imprimée au mobile. Ce produit de la masse par la vitesse M V est nommée par les mécaniciens, *quantité de mouvement;* aussi, disent-ils que les forces sont proportionnelles aux quantités de mouvement (Newton). Évidemment nous considérons ici seulement les *impulsions* dont le corps est animé, c'est-à-dire que les forces cessent d'agir aussitôt leur effet produit, laissant le corps parcourir l'espace de lui-même. Dans la gravité, le contraire arrive ; c'est une force continue, son effet instantané serait fai-

ble, mais se continuant pendant un temps notable elle produit une vitesse à la fin du temps déterminé, et par suite elle se mesure par cette vitesse. C'est cette vitesse qui est la même pour tous les corps, quelle que soit la quantité de matière renfermée dans un volume donné, autrement dit quelle que soit leur *masse*.

La notion de la masse, est pour un grand nombre de personnes, entourée d'obscurité. Ce terme dans le langage ordinaire exprime la quantité de matière; or cette quantité, comment l'évaluer? Est-ce en comptant les parcelles d'un corps? Mais alors, comment le faire? et de plus quelle connaissance avons-nous de la constitution intime du corps? Aucune. Nous n'avons donc réellement d'autre moyen élémentaire pour mesurer la masse d'un corps, que de la déduire de la vitesse acquise par ce corps lorsqu'il est mis en mouvement par une force déterminée. Pour donner à des corps de masse différente des vitesses *identiques*, il faut employer des *forces proportionnelles aux masses*. Réciproquement, si des masses inégales soumises à des forces inégales et connues, acquièrent des vitesses égales, nous prendrons pour mesure du rapport des masses, celui des forces employées. De cette façon, nous obtiendrons le rapport des masses sans pour cela connaître leur valeur absolue.

Un tel procédé empirique serait long et incertain, mais heureusement pour la pratique, nous pouvons arriver au même résultat plus rapidement à l'aide de la pesanteur. Galilée a démontré autrefois, et depuis les expériences faites dans le vide et celles faites à l'aide du pendule ont confirmé que la gravité terrestre imprime à tous les corps la même vitesse. La mesure de cette vitesse est naturellement celle acquise par un corps tombant librement pendant une seconde de temps. Cette vitesse est telle que (d'après la théorie mathématique), le corps continuant à se mouvoir, étant soustrait aux impulsions successives dues à la gravité, parcourrait un espace double dans

un temps égal. Cette vitesse est égale à $9^m,80$ après une seconde de chute. Ainsi un corps de masse *m* est soumis de la part de la gravité à un effort $m.g$ que nous nommons *Poids*, donc $P = mg$ et par suite *nous pouvons évaluer les rapports des masses par ceux des poids*. Je dis *rapports* et non les valeurs absolues qui nous seront toujours inconnues, car elles dépendent de la nature de la force de gravité et de la nature de la matière; mais pour la pratique de la science, la connaissance des rapports est suffisante.

A première vue il semble que le poids soit représenté par une vitesse (g), il n'en est rien. Le poids est représenté comme toutes les forces par un analogue de la quantité de mouvement; les anciens, pour distinguer celle-ci de celle qui correspond aux mouvements uniformes l'avaient nommée *force motrice*, et ils appelaient la valeur *g force accélératrice;* aujourd'hui on emploie de préférence et avec raison le mot *accélération*. Donc *le poids est le produit de la masse par l'accélération imprimée en une seconde de temps par la force mouvante.* Il est impossible d'exprimer la cause inconnue de l'effort autrement que par le moyen de son effet.

Le poids nous fait encore connaître une classe de forces non encore examinées par nous. En effet, placé sur un obstacle qui résiste à son action, un corps pesant exerce une *pression*. Cette force est entièrement différente de celle qui produit le mouvement, et en réalité tant qu'elle reste pression elle n'est en rien comparable au mouvement. L'obstacle qui retient le corps vient-il à être enlevé, ce dernier est mis en mouvement avec une vitesse croissante, et si dans sa chute il rencontre un autre corps, il peut le mettre en mouvement et faire un travail, vaincre une résistance. Il peut, par exemple, frapper une médaille en surmontaut sur un certain *espace* en profondeur, la résistance du métal produite par sa cohésion, ou s'enfoncer dans la terre en surmontant la résistance du sol jusqu'à une profondeur plus ou moins grande.

Nous avons rappelé ces faits très-connus en conservant intentionnellement les termes qui servent à les exprimer dans le langage ordinaire. Ces expressions en raison même de leur nature vague et prêtant à l'équivoque, facilitent la classification des forces d'après leur nature, et nous permettent de les rapporter à la véritable signification des termes scientifiques.

Nous arrivons donc à reconnaître deux classes de phénomènes très-différents confondus sous le même nom de *forces* sans rien avoir de commun, savoir les *pressions*, et les *masses animées de vitesse*.

La première, due au poids, n'est pas la seule force de ce genre connue en physique; il y a encore celle produite par l'action des gaz condensés dans des récipients; celle exercée par les corps chauffés, vapeurs liquides et solides, dilatés par la chaleur; celle engendrée par des substances molles quand elles sont comprimées, etc. Ces pressions forment des sources de *force disponible* pour un *travail utile* quelconque.

Les physiciens modernes ne sont pas encore arrivés à s'entendre sur le choix des expressions à employer pour désigner ces deux genres de forces très-différentes. Les Anglais voudraient avec Rankine que toute force de l'ordre mécanique se nommât *énergie*, et par *énergie potentielle* on désignerait celle produisant une pression, laquelle l'obstacle étant enlevé devient *énergie actuelle* ou cinétique, et produit le mouvement.

L'UNITÉ

DES

FORCES PHYSIQUES

LIVRE PREMIER

DU CALORIQUE

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS ET LOIS GÉNÉRALES DU CALORIQUE

Pour les anciens, le *feu* était la cause de la vie : ils le regardaient comme le principe animant l'univers; aussi armèrent-ils du feu la main droite de Jupiter tonnant. Agent subtil, incoercible, capable de tout traverser, de tout détruire et de tout modifier, il a été, avec raison, depuis les temps les plus reculés compté parmi les grandes forces de la nature. Mais le feu est un phénomène assez complexe : il suppose un grand dégagement de chaleur dans un corps, avec production de lumière et altération chimique des substances qui entrent en combustion. Ces effets sont causés par un certain agent ou principe mis en activité. Qu'est ce que le feu ?

Pour le connaître, la science moderne, précisant les vagues notions de l'antiquité, a distingué ses diverses manifestations et a reconnu son influence dans certains phénomènes, auxquels, à première vue, il ne semble prendre aucune part. Les effets d'élévation de température, de production de lumière, de décomposition dus à l'agent calorifique, ont été soigneusement séparés des phé-

nomènes singuliers, d'un genre analogue, qui accompagnent le feu céleste, c'est-à-dire la foudre, déjà appelée *feu électrique* par les premiers électriciens. Enfin, on a réussi à montrer clairement son incessante intervention dans l'économie de la nature et à en pénétrer le mystère. Il a fallu d'abord analyser tous les faits, toutes les observations ; à présent la science doit suivre une autre méthode, elle doit rapprocher et mettre en parallèle tous les phénomènes partiels ordinairement réunis en un seul phénomène naturel. Mais l'exposé de cette grande synthèse serait inintelligible et sans fondement si elle n'était précédée d'une analyse rigoureuse ; par conséquent, en développant le sujet de ce livre, nous commencerons par exposer séparément les divers aspects sous lesquels la science reconnaît l'action de cette cause universelle, et nous ne formulerons pas une définition avant de pouvoir la déduire des faits cités auparavant.

Sensation de chaud.

Nous examinerons d'abord l'action et les lois du principe qui produit en nous la sensation du chaud ou de la chaleur, et qui a reçu des physiciens le nom de calorique pour le distinguer de la sensation elle-même [1]. Mais, outre cet effet produit sur l'homme et tous les êtres doués de sensibilité, la présence du calorique se manifeste dans les corps non organisés par un changement de volume, et, d'une manière générale, on peut dire que dans toutes les substances une addition de calorique est accompagnée de dilatation, et une soustraction, de contraction.

La sensation dont il vient d'être question est un phénomène purement vital d'un genre complétement différent de la dilatation des corps, et bien qu'il se produise d'abord par une telle dilatation, cependant l'une n'a rien de commun avec l'autre ; en effet, dans les très-violentes soustractions de calorique faites au corps de l'homme, telles qu'on peut les obtenir par le contact de corps très-froids, on a une sensation de brûlure semblable à celle que l'on éprouve en touchant un corps rouge de feu. A cause de cela nos perceptions tactiles ne pourront jamais nous servir de guide pour mesurer l'intensité du calorique et encore moins pour connaître sa nature.

[1] Nous userons cependant indistinctement des mots *chaleur* et *calorique*, bien que le terme chaleur soit par quelques-uns réservé exclusivement à la sensation.

La mesure de la force calorifique est fondée sur les phénomènes de la dilatation; elle s'effectue à l'aide des *thermomètres*, instruments dans lesquels une dilatation donnée peut être évaluée avec exactitude, et l'intensité de cette force constitue la *température*, nommée aussi *tension calorifique*. Mesure de la chaleur

Une longue expérience des propriétés des corps chauds a fourni quelques lois qui, étant indépendantes de toute vue théorique, doivent nous servir de point de départ.

Première loi. — *Le calorique, dans tous les corps, tend à l'équilibre;* autrement dit, il s'effectue un échange continuel entre les corps chauds mis en contact ou placés à distance, jusqu'à ce que tous soient à la même température ou tension calorifique, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'un appareil thermométrique indique pour tous une égale dilatation. Cet échange s'effectue entre corps au contact, en vertu de la propriété nommée conductibilité, et entre corps placés à distance, par le moyen du rayonnement. De là la distinction du calorique statique ou de conductibilité et du calorique rayonnant. Dans ce livre nous étudierons les effets du premier genre, laissant les autres pour le livre suivant. Équilibre de température.

Mais deux corps à la même température renferment, le plus souvent, des quantités de chaleur bien différentes, d'où une deuxième loi.

Deuxième loi. — *Pour élever des poids égaux de substances diverses à la même température, les quantités de calorique nécessaires ne sont pas égales.* Ainsi, la quantité de calorique, qui échauffe de 1° un kilogramme d'eau, échauffe de 9° un kilogramme de fer. De telle sorte qu'en mélangeant deux masses égales, l'une d'eau à 10°, et l'autre de fer à 0°, le mélange se trouve à 9°; donc l'eau, s'abaissant d'un seul degré, échauffe le fer de 9°. Les quantités relatives de chaleur nécessaires pour élever le même poids de deux corps à une égale température, sont nommées *chaleurs spécifiques*, et on dit que ces corps ont une différente *capacité* pour la chaleur. Ici il est évident que l'on ne mesure pas les quantités absolues, mais seulement les quantités relatives. Pour cela on est convenu de tout rapporter à l'eau et de prendre comme *unité de mesure la quantité de chaleur nécessaire pour élever de* 0° *cent. à* 1° *cent.* 1 *kilogramme d'eau distillée*. L'unité, ainsi déterminée, Chaleurs spécifiques.

est dite *calorie*. Ce procédé rappelle celui employé en mécanique dans l'évaluation des forces ou des masses ; on les rapporte toujours à une force ou à une masse unité, de cette façon, pour étudier les phénomènes et en calculer les rapports, il n'est pas nécessaire de savoir en quoi consiste la nature du calorique, disons même que, jusqu'à présent, il nous est impossible de mesurer une quantité de chaleur d'une façon absolue.

État des corps.

TROISIÈME LOI. — *L'état physique des corps, état solide, liquide, aériforme ou gazeux, dépend de la quantité du calorique*, et tous les corps peuvent passer par ces trois états si on leur fournit une quantité de chaleur suffisante. La forme gazeuse ou aériforme est considérée comme celle dans laquelle les molécules des corps sont complétement libres et mobiles, et, de plus, douées d'une force expansive indéfinie. Dans les liquides, les molécules sont mobiles sous la plus faible impulsion, mais elles n'ont pas d'expansibilité; enfin, dans les solides, les molécules sont réunies par les forces dites, à cause de cela, de *cohésion*. Aussi ont-ils une forme propre dépendante des liaisons déterminées par les forces *attractives*. En général, à ces trois états correspondent des volumes différents et une mobilité différente des molécules; celle-ci est maximum dans les gaz et minimum dans les solides. Remarquons en terminant que nous ignorons complétement ce que sont les forces attractives, nous les acceptons comme un fait, et nous les désignons avec un terme convenu. Plus tard, nous nous entendrons sur le véritable sens de cette expression.

Chaleur latente.

QUATRIÈME LOI. — *Dans tout changement d'état d'un corps, une certaine quantité de calorique devient, comme on le dit,* LATENTE, *si le corps passe d'un état physique dans lequel les molécules sont* MOINS *libres à un autre état dans lequel elles le sont* PLUS ; *réciproquement, il se développe du calorique lors du changement inverse.* Cette loi a une importance capitale, et elle est fondée sur les faits les plus certains et les plus vulgaires[1]. Si, par exemple, on mêle 1 kilogramme de glace à 0° avec une égale quantité d'eau à 79°, le mélange se trouve être à 0° lorsque toute la glace est fondue ;

[1] Rigoureusement parlant, la capacité de l'eau pour la chaleur n'est pas la même à toutes les températures; elle croît avec ces dernières; et la même chose se présente pour tous les autres corps, mais ici nous faisons abstraction de ces petites différences.

donc ce corps solide, pour se liquéfier, a absorbé tout le calorique contenu dans l'eau, et il était de 79 calories; ce calorique, n'ayant produit aucun effet sensible sur le thermomètre, est appelé *latent;* mais évidemment il a produit un autre effet; il a détruit les liens qui tenaient réunies les molécules de l'eau solide, et leur a rendu la mobilité propre aux liquides.

De même, aussi, lorsqu'un corps passe de l'état liquide à l'état de gaz, une certaine quantité de chaleur devient *latente*, cette quantité est de 606,5 calories pour l'eau. Réciproquement, en condensant la vapeur à l'état liquide, on rendra libres les 606,5 calories absorbées dans le phénomène inverse, de même dans la solidification de l'eau les 79 calories absorbées par la fusion de la glace se dégagent. Donc, en réalité, la quantité absolue de calorique n'est pas égale dans un corps sous ses divers états la température étant toujours la même; cette chaleur peut donc recevoir le nom de chaleur latente. Les dénominations précédentes, et beaucoup d'autres, furent suggérées par certaines idées théoriques très-anciennement acceptées sur la nature du calorique; nous en verrons la véritable signification physique : pour le moment, nous les accepterons comme termes de convention renfermant l'énoncé des faits.

Cependant, pour s'affranchir de ces vieilles idées, les modernes commencent à employer les expressions de *calories de température*, de *fusion*, d'*évaporation*, de *dilatation*.

Cinquième loi. — La dilatation des corps varie suivant la nature de la substance et de leur état physique. Pour les gaz on peut admettre comme approximative cette loi, que *les dilatations sont proportionnelles aux températures, et que les densités varient en raison directe des pressions*. La première partie de cette loi établie par Gay-Lussac (aussi en porte-t-elle le nom), était regardée comme vraie pour tous les gaz et les vapeurs; mais il a été démontré par M. Regnault qu'elle est d'autant plus éloignée de la vérité que le corps aériforme est plus voisin de son point de liquéfaction. Pareille observation s'applique à la deuxième partie de l'énoncé précédent, connue sous le nom de loi de Boyle ou de Mariotte. Elle n'est vraie que pour les gaz dits *parfaits*, c'est-à-dire très-éloignés de leur point de liquéfaction. Ces lois sont des lois

Rapport de la chaleur et des volumes

limites auxquelles satisfont les substances, à la condition d'être soustraites à toutes les influences perturbatrices des forces nommées moléculaires qui exercent toute leur action quand le corps approche d'un changement d'état. De même pour les astres, le mouvement elliptique est une loi limite convenant au cas d'un corps central unique et d'un astre unique circulant autour de lui ; mais comme il existe plusieurs planètes, le mouvement elliptique n'a lieu qu'approximativement. La force expansive que les corps, et spécialement les gaz, reçoivent du calorique, est celle qui est utilisée comme puissance motrice dans toutes les *machines à feu*, et c'est en vertu de cette force expansive que la machine fait un travail, comme nous le verrons mieux dans la suite.

Le calorique est dit un *impondérable*, car les corps, pour être chauds, n'en sont pas plus lourds que lorsqu'ils sont très-froids; on en admet l'existence dans tous les corps, parce que, quelque refroidis qu'ils soient, on peut toujours les supposer soumis à un refroidissement encore plus grand. Nous citerons les autres lois à mesure que le besoin s'en fera sentir. Examinons actuellement quelle est la nature du calorique.

CHAPITRE II

APERÇU HISTORIQUE ET EXPOSÉ DE LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Ancienne notion du calorique.

Le calorique a été considéré jusqu'à ces dernières années, même par les plus célèbres physiciens, comme une substance *sui generis*, non soumise à la gravité, qui, en s'interposant entre les pores des corps, en augmente le volume. Cette théorie expliquait un grand nombre des faits les plus importants alors connus, tels que l'invariabilité des chaleurs spécifiques, et de la chaleur latente. On admettait, en effet, que le calorique pouvait se loger dans les pores des corps de façon à ne pas être sensible au thermomètre, et que les divers substances avaient une capacité calorique différente. Cette théorie permit aux expérimentateurs et aux géomètres de soumettre les phénomènes à l'observation et au calcul ;

aussi fut-elle acceptée par des savants illustres, comme Laplace, Lavoisier, Carnot, Gay-Lussac, etc.

D'autres physiciens, à leur tour, étudièrent l'intime relation existant entre le mouvement et la chaleur, relation telle que toute variation thermique se traduit par une variation de volume, laquelle ne peut se faire sans un mouvement ; et que, réciproquement, tout mouvement engendre constamment de la chaleur. Ils conclurent de leurs recherches que le calorique est un mouvement qui a lieu dans l'intérieur des corps, en vertu duquel les distances intermoléculaires varient lorsque ces molécules entrent en collision sous l'influence des agents extérieurs, mécaniques ou chimiques. Newton dit sans hésitation : la chaleur est un mouvement vibratoire dans les corps[1]. Rumford et Montgolfier développèrent cette théorie. Le premier s'appuyait sur les phénomènes les plus ordinaires du frottement. Il observait l'immense quantité de chaleur développée dans le forage des canons, et concluait que cette production de chaleur ne pouvait s'expliquer avec les idées régnantes à son époque, c'est-à-dire en admettant la matérialité de la chaleur. En effet, la capacité calorifique du métal ne changeait pas, la chaleur n'était pas soustraite aux corps ambiants, lesquels ne pouvaient pas du reste laisser échapper indéfiniment du calorique, à la façon d'une éponge qui, pressée, laisse écouler l'eau dont elle était imprégnée. Seule, la force mécanique employée pour mettre les parcelles métalliques en mouvement permettait d'expliquer cette production inépuisable de chaleur. Les expériences de Rumford sont encore aujourd'hui un point de départ important dans la théorie mécanique de la chaleur, et peuvent servir à trouver le rapport entre la chaleur dégagée et la puissance dépensée. Davy avait encore observé que le frottement est une cause de chaleur. Il vit que deux morceaux de glace frottés l'un contre l'autre fondaient peu à peu, même quand on opérait dans une atmosphère au-dessous de zéro. Mais l'illustre chimiste anglais ne sut pas tirer parti de cette observation pour la théorie.

Idées modernes.

Newton.

Rumford.

Montgolfier s'appuyait sur le principe de la conservation de la

Montgolfier.

[1] *Questions d'optique*, t. V, p. 294 de l'édition de Londres, 1706. — « Annon... agit lumen in corpora ad ea calefacienda scilicet motumque vibrantem in quo calor consistit in partibus excitandum? »

force vive dans le choc des corps, et il fut conduit à méditer sur ce sujet par l'étude d'une machine de son invention nommée bélier hydraulique; mais il s'arrêta peu à ces idées, et cet homme remarquable est connu bien plutôt par la découverte des aérostats en papier que par des recherches sur la thermo-dynamique.

Fresnel. Par les progrès de l'optique, et spécialement à la suite des travaux de Fresnel, la généralité des savants fut conduite à accepter le système des ondes pour expliquer les phénomènes lumineux; on admit que la lumière consistait en un mouvement vibratoire, ayant quelques analogies avec le mouvement sonore. Le son engendré ordinairement par la vibration des solides se propage par l'intermédiaire de l'air et des autres fluides. Semblablement, la lumière et toutes les vibrations calorifiques ou chimiques composant les rayons émanés des corps incandescents auraient leur origine dans les mouvements oscillatoires des corps lumineux, et pour se propager ils nécessiteraient l'intermédiaire d'un fluide. Ce fluide fut nommé éther et on admit qu'il était répandu dans tout l'univers.

Melloni. Les belles découvertes de Melloni sur le calorique rayonnant ont affirmé les analogies de ce mode de chaleur avec la lumière. Aussi Melloni, qui, entraîné tout d'abord par les idées de son époque, avait cherché à établir la distinction entre ces deux agents, arriva peu à peu à professer hautement que les *rayonnements* calorifique et lumineux *étaient de simples mouvements*. Cette théorie se répandit parmi nous grâce aux efforts du P. Pianciani, et plusieurs théories de ce physicien distingué, regardées alors comme trop avancées, ont été complétement vérifiées par les découvertes ultérieures[1].

Difficultés. Mais les notions exactes sur l'action mécanique de la chaleur dans l'intérieur des corps manquaient, et les défenseurs des nouvelles doctrines ne purent expliquer nettement ce en quoi consistaient la *température*, *la capacité des corps pour la chaleur*, et les phénomènes dits de *chaleur latente*. De plus, les savants livrés aux recherches d'optique et ceux adonnés à l'étude du calorique statique, formaient, pour ainsi dire, deux camps opposés. On n'a-

[1] Voy. les *Institutions physico-chimiques*, de G. B. Pianciani. Rome, 1835, vol. IV, appendice théorique.

vait pas encore cherché quels rapports relient ces deux branches de la physique, il était donc impossible de présenter une théorie homogène. On oscillait sans cesse des idées anciennes aux nouvelles et la langue scientifique se chargeait d'expressions mal définies ou détournées de leur véritable sens physique.

Seuls les mécaniciens théoriciens commencèrent tardivement à s'occuper de la chaleur comme puissance motrice. En 1824, Sadi Carnot donna une célèbre théorie de la machine à vapeur qui fut le point de départ et le sujet de nouvelles recherches. Il partait de ce principe que le calorique est une substance qui, se conservant sans altération dans son passage à travers la machine, produit néanmoins le mouvement durant ce trajet. Évidemment d'après cette hypothèse la chaleur devait se trouver en égale quantité aux deux extrémités d'une machine à feu, mais on ne pensa point à vérifier expérimentalement ce résultat théorique, dont l'inexactitude a été plus tard parfaitement établie. Carnot fut suivi par Clapeyron[1] qui exposa les principes et trouva les formules analytiques nécessaires pour estimer le travail effectué par le calorique. Les savants acceptèrent comme axiome fondamental l'impossibilité de créer soit la force motrice, soit le calorique, par conséquent c'était au moment où un corps chaud cédait sa chaleur à un corps froid, que la chaleur produisait la force mécanique. Carnot. Clapeyron.

Cette disparition d'une portion de chaleur, si elle avait été bien prouvée, aurait tranché la question théorique, parce qu'une substance ne peut s'anéantir. Toutefois les faits observés par Carnot sont très-intéressants. Il prouva que la quantité de travail utilisé avec la chaleur ne dépend pas de la substance qui lui sert de véhicule, et il établit les règles pour obtenir l'effet utile maximum avec une *chute* de température déterminée. Inutilité de la matière calorique.

Considérant le calorique comme une substance inaltérable, la chute dont nous venons de parler ne pouvait être pour lui qu'une diminution de la *tension* du calorique. Or elle pouvait évidemment avoir lieu indépendamment de la *matière calorique*, il suffisait pour cela de douer de tension la *matière pondérable*, véhicule de la matière calorique. Le calorique est donc réellement une superfluité en tant que matière, et cela explique pourquoi la

[1] *Journal de l'École polytechnique*, t. XIV, p. 159, chap. XXIII, 1834.

théorie de Carnot s'est adaptée admirablement bien aux idées modernes. Cette théorie suppose deux matières unies : calorique et vapeur, la première est indispensable pour donner la tension à la seconde, et l'accompagne toujours; mais il est clair que l'on peut toujours donner directement cette tension à la vapeur; qui la conservera dans sa masse, sans avoir besoin d'être accompagnée fidèlement par l'impondérable. Nous reviendrons plus tard sur les découvertes de Carnot qui, malgré leur importance, restèrent longtemps stériles, peut-être à cause de la façon dont elles étaient exposées. Ces recherches ont été estimées à leur vraie valeur dans ces dernières années, à partir de l'époque où Clapeyron vers 1834 en développa plus clairement les principes, donnant des formules analytiques, et des méthodes de calcul plus conformes aux procédés modernes de la mécanique.

Séguin. Un point restait encore à éclaircir. Comment la puissance mécanique dérive-t-elle de la chaleur? quelle relation lie l'une à l'autre? on l'ignorait. Séguin, le premier, démontra d'une façon rigoureuse vers 1839, qu'il y avait toujours perte de chaleur dans une machine, lorsqu'elle accomplissait un travail; et il essaya même d'évaluer le rapport entre le travail produit et la chaleur perdue, en prenant pour point de départ l'impossibilité du mouvement perpétuel. Plus tard, vers 1842, le médecin allemand Mayer de Heilbronn raisonnant sur les phénomènes physiologiques, sur les effets de la nutrition et sur la chaleur animale, reconnut qu'il existait nécessairement une relation déterminée entre le travail exécuté dans la machine animale et la quantité de chaleur dégagée dans les combustions internes. Mayer, le premier, osa employer l'expression *équivalent mécanique de la chaleur*. Naturellement les considérations physiologiques se prêtaient mal à la détermination de la valeur numériqne de ce rapport, mais pour arriver à ce but, Mayer sut avec une sagacité profonde tirer parti des propriétés thermiques des gaz, ainsi que nous le dirons en temps utile. Le procédé était bon, car l'expérience nous montre constamment que la chaleur n'accomplit jamais un travail sans l'intermédiaire d'un changement de volume survenant dans les corps; et sous ce rapport les gaz sont de toutes les substances, celles qui se prêtent le mieux à l'observation.

(Marginal note beside "Mayer de Heilbronn": Mayer.)

Mayer trouva un nombre inexact, non parce que sa méthode était vicieuse, mais parce qu'il disposait de données expérimentales imparfaites; et son calcul repris avec de meilleurs éléments a donné un résultat qui compte au nombre des plus précis. C'est donc à lui que revient l'honneur d'avoir posé le principe de la conservation des forces, et du rapport constant qui s'observe quand une force se transforme en une autre. Il essaya encore de déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur avec le secours de la mécanique, mais privé des moyens nécessaires pour faire des expériences, il se borna à examiner au point de vue de sa théorie le fait que l'eau des cuves des moulins à papier s'échauffe par suite de l'agitation dans laquelle elle est maintenue par une force de quelques chevaux. Il appliqua enfin toutes ces notions à la mécanique animale avec une ingénieuse habileté, mais ces idées parurent alors tellement étranges que leur auteur fut traité de fou, et il put difficilement faire accepter ses mémoires par les publications périodiques de l'époque. Il ne se découragea point cependant et appliqua ces principes à la mécanique céleste, ouvrant ainsi un champ immense d'applications sur lesquelles nous nous arrêterons longuement.

La lecture du mémoire original de Mayer surprend par la fermeté et la conviction dont l'auteur fait preuve; et on doit avouer que les physiciens qui ont suivi Mayer dans cette voie n'arrivent qu'à être les commentateurs de ses idées pleines de profondeur. Mais un langage souvent en désaccord avec celui accepté par les mécaniciens, et l'absence de nouvelles données expérimentales firent négliger ce remarquable travail par plusieurs savants. Heureusement les mystères de la nature, révélés par le médecin d'Heilbronn avec cette puissance de raisonnement, qui est le propre de sa nation, furent confirmés et étudiés par un homme plus positif d'une manière plus pratique et mieux en harmonie avec les exigences de la science moderne. L'Anglais Joule se proposa de déterminer avec précision *suivant quels rapports le mouvement mécanique se transforme en chaleur*. Il commença ses recherches en 1844. Il faisait mouvoir dans l'eau une roue animée par la chute d'un poids, la température atteinte par l'eau lui permettait d'estimer le calorique dégagé, et la hauteur de laquelle tombait le Joule.

poids donnait le moyen d'évaluer le travail mécanique effectué; calculant le rapport entre ces deux quantités il fixa l'*équivalent mécanique de la chaleur*. Cette expérience ne différait pas quant au fond d'une autre faite par Rumford longtemps auparavant, et surtout elle n'était que l'étude précise du fait observé par Mayer, que l'eau des cuves d'une fabrique de papiers s'échauffe par l'action mécanique de l'agitateur; mais elle eut l'avantage d'être faite avec précision et de fixer l'attention des physiciens. M. Joule constata encore que avec le mercure on obtient la même valeur de l'équivalent : et prouva ainsi que cette valeur est indépendante de la substance agitée. La question ainsi présentée fut rapidement étudiée sous toutes les formes possibles, et il en résulta une théorie complète des machines les plus employées.

Exagération de la théorie.

Plusieurs savants, entraînés par ces résultats remarquables, poussèrent à une exagération regrettable les hypothèses sur la nature de ce mouvement moléculaire. On attaqua violemment les idées de Fresnel sur l'éther et on se refusa à admettre l'existence d'un milieu impondérable, on jugea la conception de la matière pondérable suffisante pour expliquer tous les phénomènes, même la propagation de la lumière; ainsi on retombait dans la théorie de l'émission; on n'accepta aucun principe impondérable et on confondit les notions de *matérialité* et de *pondérabilité*. Nous parlerons en lieu convenable de ce système, résultat direct de la théorie mécanique de la chaleur.

Une école, du reste, assez nombreuse et fort respectable, considère le calorique non comme une substance, mais comme une *force*, c'est-à-dire comme un principe *sui generis* (exemple : la gravité) duquel dériveraient tous les phénomènes calorifiques. Cette école considère les phénomènes calorifiques comme des échanges de travail s'effectuant entre les corps, et l'équivalent mécanique de la chaleur est accepté comme un fait. On doit applaudir aux efforts de cette école en tant qu'elle applique aux phénomènes de la chaleur la méthode qui fut suivie par les géomètres dans l'étude des phénomènes célestes, car elle en recherche les lois sans analyser la nature du principe initial. Mais si cela suffit à la géométrie et à la science appliquée, il n'en est pas de même pour la physique. En effet, non-seulement le physi-

cien cherche à se faire une idée claire des faits et des lois d'après lesquels une force agit, mais il s'efforce encore de connaître quelle est la nature de cette force. Pour lui la gravité elle-même fournit un ample sujet à la spéculation, car nous ne savons rien de son origine et cependant ses lois nous sont parfaitement connues.

Donc, pour suivre les principes de la vraie philosophie, dont Huygens disait[1] : « Toutes les causes des phénomènes naturels doivent se concevoir comme des actions mécaniques, si toutefois nous ne voulons pas désespérer de comprendre quelque chose à la philosophie naturelle. » Nous devons chercher « s'il serait possible de ramener les phénomènes du calorique à un simple échange de mouvement entre les corps, sans recourir à un autre principe, à moins que l'insuffisance d'une semblable explication ne soit parfaitement démontrée. » Le calorique mouvement.

Mais considérer le calorique comme un mouvement n'empêche pas de le nommer une *vraie force* en employant ce mot pour exprimer la *cause* quelle qu'elle soit d'un *mouvement*. Un grand nombre des objections élevées contre la théorie mécanique des forces, résultent de l'équivoque auquel se prête l'emploi du mot *mouvement*. On peut regarder cette modification du corps par rapport aux objets extérieurs, et alors le corps n'acquiert aucune propriété particulière ; par exemple il peut changer de relation par rapport à eux, non par sa propre translation mais par le transport des autres. Mais si nous considérons la translation véritable inhérente au corps lui-même, cela implique pour nous l'idée d'une vitesse que le corps lui-même possède, par laquelle il franchit un espace dans un certain temps, et qui est l'effet d'une cause ou d'une force qui la lui a communiquée. Ainsi donc, masse de matière animée de vitesse est quelque chose de plus qu'un simple mouvement, c'est une force dans la large acception du mot. En effet, quand une masse matérielle a été mise en mouvement, elle devient capable de produire un effet égal à l'effort déployé pour lui donner le mouvement qui l'anime. Par suite, elle peut vaincre une résistance exté-

[1] *Tractatus de lumine*. Amsterdam, 1827, p. 2. Omnium effectuum naturalium causæ concipiuntur per rationes mechanicas, nisi velimus omnem spem objicere aliquid n physicis intelligendi.

rieure et par là même effectuer un *vrai travail* dans le sens mécanique du mot, c'est-à-dire, *vaincre une résistance le long d'un chemin déterminé et pendant un temps défini*, *travail* qui se nomme aussi *effet dynamique* de la force et dont la mesure est le demi-produit de la masse par le carré de la vitesse, c'est-à-dire la *force vive*, comme on le démontre par le calcul. Je citerai à ce propos un fragment des écrits de Poncelet[1]. « Un corps mis en « mouvement, un certain effet dynamique (force vive), peut, à « son tour, devenir une cause ou source de travail... L'inertie, « quand elle a été vaincue, devient capable de restituer la quan- « tité de travail dépensée de même qu'un ressort qui a été bandé. « En un mot, l'inertie comme un ressort sert à emmagasiner le « travail mécanique en le transformant en force vice, de sorte que « la force est un véritable travail disponible. » Et ailleurs[2] : « L'inertie sert à emmagasiner le travail des moteurs en le con- « vertissant en force vive et à le restituer intégralement ensuite « lorsque cette force vive vient à être détruite contre ces ré- « sistances. »

Ainsi travail et effet dynamique, force vive et masse animée d'une certaine vitesse sont des expressions qui peuvent se substituer. En mécanique le mot force vive représente l'effet total de toutes les impulsions plus ou moins prolongées, imprimées à un corps pendant un certain temps, effet exprimé par la masse multipliée par le carré de la vitesse.

D'où il résulte la possibilité de convertir numériquement l'effet d'une force en celui d'une autre, et d'évaluer la quantité de travail mécanique propre à chacune d'elles lorsqu'on connaît la masse et la vitesse d'un corps, d'où il résulte encore le moyen de convertir un travail en un autre, ou, pour parler plus simplement l'effet d'une masse en mouvement dans celui d'une autre équivalent.

Par exemple, un mouvement de translation se convertit en mouvement rotatoire ou en mouvement vibratoire, et le travail d'un homme qui met une cloche en branle se transforme en mouvement vibratoire de l'air, lequel produit le son.

[1] Poncelet, *Mécanique industrielle*, part. I, n° 124.
[2] P. 86, n° 138.

Nous nommerons donc le mouvement une force sans craindre de tomber dans un abus de mots en confondant la cause avec l'effet, car les notions de force et de mouvement ne se différencient pas par la diversité de nature, mais par la diversité des rapports. Une masse qui a absorbé un certain travail pour se mettre en mouvement, peut devenir, à son tour, puissance et exécuter un travail. Nous chercherons donc à réduire tous les phénomènes à de simples échanges ou communications de mouvement, et nous admettrons cet échange comme un fait primordial dont on trouve la raison dans la nature même de la matière.

Donc, assimiler le calorique à un mouvement n'empêche pas de le regarder comme une véritable force et d'en calculer les effets. La chaleur produit divers genres de mouvements; d'un autre côté, les mouvements ordinaires de la matière pesante peuvent se transformer en chaleur et réciproquement; il nous faut donc traiter ce sujet avec quelque développement, et définir les résistances que le calorique doit surmonter dans les corps, c'est-à-dire les différents genres de travail qu'il accomplit.

CHAPITRE III

TRANSFORMATION DU MOUVEMENT EN CHALEUR.

Le mouvement produit la chaleur.

Un ancien axiome dit : *Le mouvement engendre la chaleur*. Nous avons déja vu quels faits conduisirent les physiciens à regarder le calorique comme un mouvement ; mais la question ne consiste pas à dire d'une manière générale que tout se fait avec *matière et mouvement*, il faut encore préciser le mode de transformation d'une espèce de mouvement en une autre.

A première vue, la chose semble assez ardue, parce que dans le mouvement ordinaire d'impulsion et dans les puissances tout se réduit à des mesures de masse et de vitesse, mais dans la chaleur on ne voit rien de semblable, et, au contraire, la chaleur se mesure à l'aide de la dilatation d'un corps; avec le thermomètre, par exemple, quelle relation peut donc exister entre deux phénomènes en apparence si différents? Si cette relation existe, assurément elle

doit être difficile à trouver; car nous ne pouvons évaluer avec précision ni les masses infinitésimales des molécules ébranlées par la vibration thermique, ni les espaces parcourues par ces molécules. Cette difficulté est réelle, et c'est elle qui retarda assez longtemps le progrès de la théorie mécanique de la chaleur, et fit dire à quelques-uns que la théorie vibratoire était par elle-même insuffisante à fonder la thermodynamique.

Manière de la transformation.

Mais dans d'autres branches de la mécanique il ne manque pas d'exemples de transformation de mouvement de translation en vibration qui peuvent nous éclairer. Considérons par exemple la production du son par une cloche : là la force vive du marteau s'éteint en produisant la vibration du corps sonore. Il n'est pas facile d'établir le rapport entre les excursions de la cloche et l'intensité du son, mais on pourrait, à l'aide d'un procédé micrométrique approprié, déterminer l'expansion que le coup fait naître dans la cloche elle-même. On sait en effet que la cloche sous l'action du choc se déforme, et que sa section, de circulaire qu'elle était, devient elliptique, si bien que les corps mis au contact d'une cloche vibrante sont lancés au loin. Une telle variation de forme équivaut en somme à une dilatation du corps, de sorte que la cloche peut arriver en résonnant au contact d'une pointe C (fig. 1) qu'elle ne touchait pas quand elle était immobile.

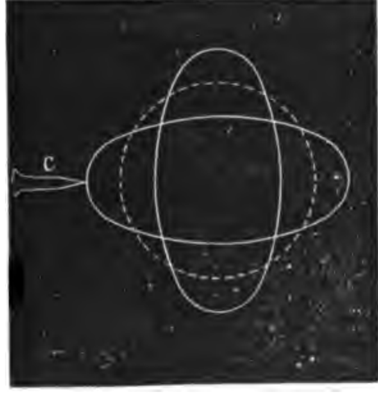


Fig. 1.

La dilatation conséquence de la vibration.

Toute molécule d'un corps ébranlée par le choc mécanique d'une masse en mouvement, entre en vibration comme la cloche, par suite elle a besoin d'un plus grand espace pour osciller; et par suite en choquant et en éloignant les voisines tout le système se trouve dilaté. Mais autant la mesure directe de l'excursion serait facile avec un corps unique, autant elle est difficile avec un agrégat d'une quantité innombrable de molécules, et la seule chose praticable est de trouver quelle aug-

mentation de volume produit une force choquante déterminée. Or, pour mettre en vibration les molécules des corps, on a souvent à vaincre des résistances intérieures d'intensité inconnue, cela arrive par exemple dans les solides et dans les liquides; ou tout au moins on a à vaincre l'inertie des molécules quand elles sont libres, comme dans les gaz; cela constitue un travail, nous sommes donc conduits forcément à déterminer à quelle force vive du corps choquant équivaut le travail intérieur qui se produit par une augmentation de volume déterminée. En d'autres termes, il faut savoir quelle force vive est nécessaire de la part du corps choquant pour produire une tension calorifique déterminée et l'accroissement d'un degré de température donné.

Travail de dilatation.

La question étant ainsi envisagée, on voit qu'il doit exister un rapport entre les puissances mécaniques ordinaires et le développement des quantités de chaleur, lequel rapport nous nommons équivalent mécanique de la chaleur, ou inversement équivalent thermique de la puissance mécanique.

Équivalent mécanique de la chaleur.

Telle est l'idée générale qui se présente immédiatement pour étudier ces deux relations. Et comme la force ne peut ni se créer ni s'anéantir, la force vive devra se trouver *égale* dans les deux extrêmes entre lesquels survient la communication du mouvement. Par suite, la mesure naturelle de la quantité de chaleur est la force vive communiquée au corps, de sorte qu'à une même force vive correspondra toujours une même quantité de chaleur produite. En d'autres termes, l'équivalent mécanique de la chaleur sera constant pour toutes les substances.

Cela ne veut pas dire que les phénomènes physiques produits seront toujours les mêmes dans tous les corps, mais au contraire ils seront différents selon les travaux qui doivent avoir lieu à l'intérieur de ces corps, selon les résistances qui devront être surmontées. Ainsi les dilatations, et les élévations de température elles-mêmes, ne sont pas égales dans tous les corps pour une même force vive communiquée; mais elles différeront suivant les liaisons moléculaires à vaincre. Bien plus, il pourra arriver que tout le travail extérieur soit employé à vaincre ces liaisons intérieures. On s'explique maintenant comment, pour produire la même élévation de température, il faut aux différents corps des

Travail de chaleur.

quantités de chaleur diverses, c'est-à-dire pourquoi les capacités calorifiques sont inégales. (Chap. I, n° 2.) On s'explique encore pourquoi la température ne varie pas pendant tout le temps qu'une masse passe d'un état à un autre (*ibid*, n° 4), et il en est de même pour d'autres phénomènes étudiés dans la théorie de la chaleur, et que nous ne pouvons énumérer tous du premier coup. Il doit arriver ici, chacun le comprendra aisément, ce que l'on observe sur les cloches, à savoir que le même coup de marteau ne produit pas la même oscillation dans toutes, bien qu'il transmette à toutes la même force vive. Il faudra donc distinguer la force vive communiquée à toute la masse de celle qui revient à chaque molécule. Il pourra se faire que, ou à cause de la masse à mettre en mouvement, ou en raison du travail à accomplir, une grande quantité de force vive agissant sur le corps ne communique à chaque molécule qu'une faible force vive. Que si nous considérons les molécules isolées, leur force vive individuelle sera la mesure naturelle de la température tant de celle qui leur est propre que de celle du corps entier auquel elles appartiennent.

On voit donc que de sa nature la théorie vibratoire du calorique était capable de suggérer de nombreuses conséquences que des expériences convenables pouvaient confirmer dans la suite. Toutefois il est certain que la marche de l'esprit humain a été différente dans cette étude et que la voie suivie par les expérimentateurs a été autre, ou que du moins s'ils ont été guidés par ces idées, ils n'en ont laissé aucun souvenir. Quoi qu'il en soit, l'expérience a confirmé toutes les conclusions théoriques exposées ici avec une extrême concision, mais que nous développerons plus tard chacune en particulier.

Détermination de Joule.

Si Mayer a conçu l'idée de l'équivalent mécanique, Joule, de son côté, est le premier qui se soit appliqué à déterminer rigoureusement à combien de *kilogrammètres de travail correspondait une calorie*, c'est-à-dire à combien de *force* mesurable par la hauteur à laquelle on devait élever un certain nombre de kilogrammes correspondait la force qui, engendrée par des actions mécaniques, peut élever dans le même temps de 0° à 1° centigrade une masse d'eau de 1 kilogramme. Joule détermina expérimentalement ce rapport au moyen de la machine dont nous avons dit un mot plus

haut dans laquelle une roue immergée dans une masse d'eau est mise en mouvement par la chute d'un poids. Contrairement à l'opinion admise, il trouva que les liquides s'échauffaient par le frottement, et malgré la faible quantité de chaleur dégagée, grâce à la sensibilité de ses instruments, il démontra que, pour produire une calorie, il fallait dépenser 428 kilogrammètres[1].

Cette force est énorme et équivaut à six chevaux-vapeur. Ainsi une machine qui aurait en chevaux-vapeur la force indiquée, en employant toute son action à échauffer 1 kilogramme d'eau, élèverait la température de cette masse d'un seul degré par chaque seconde de temps ; et, d'une manière générale la force qui transporterait 428 kilogrammes d'eau à 1 mètre de hauteur dans un temps quelconque, si elle était employée à élever la température de la masse d'eau elle-même ne produirait qu'une variation thermométrique de 1° centigrade dans le même temps. On construisit dans la suite d'après ces principes quelques machines dans lesquelles, utilisant la chute de l'eau, on réduisait ce liquide en vapeur par la force mécanique développée avec ces machines. Mais on reconnut généralement que, en raison de la valeur considérable de l'équivalent mécanique de la chaleur, ces machines étaient pratiquement inutiles et qu'il vaut mieux employer leur force à comprimer l'air, puis utiliser cet air comprimé comme moteur au lieu de la vapeur obtenue par le moyen précédent.

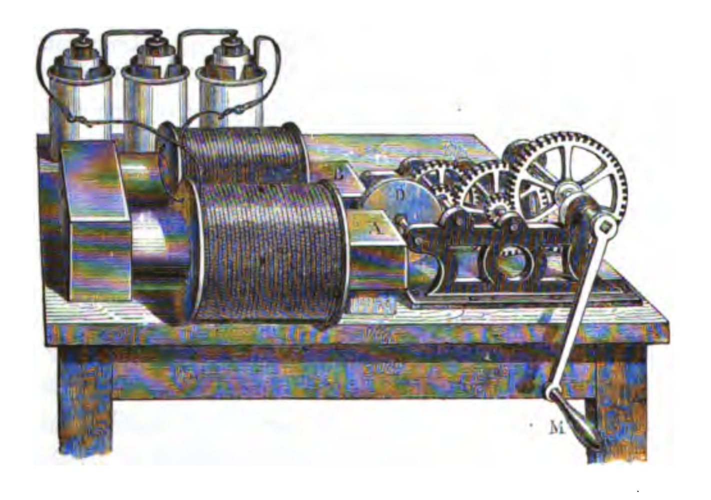
Chaleur obtenue par frottement.

Dans l'opinion des premiers physiciens, il fallait un frottement très-considérable et un état rugueux très-marqué des surfaces frottantes pour qu'il y eût dégagement de chaleur par action mécanique. Si, en effet, dans les machines ordinaires les aspérités augmentent la dépense de force motrice et produisent des frottements au lieu d'un effet utile, pendant qu'elles développent une plus grande quantité de chaleur dans les parties qui manquent de substances lubrifiantes ; cependant ces aspérités ne sont pas nécessaires et une machine développe de la chaleur malgré les corps gras employés pour en éviter la prompte détérioration. Ainsi M. Joule et, plus tard, Foucault, ont fait

[1] Indépendamment des recherches de Joule, M. Bianconi, en Italie, avait constaté l'échauffement des liquides par le mouvement. Les marins savent parfaitement qu'après une tempête la mer est plus *chaude*.

voir que la force mécanique peut se convertir en chaleur par le moyen d'une résistance exercée sans contact d'aucun genre. A l'aide de la manivelle M, on fait tourner (fig. 2) un disque de cuivre D entre les deux pôles A et B d'un puissant électro-aimant très-rapprochés de la surface du disque. Le disque s'échauffe à un point tel qu'il devient impossible d'appliquer la main à sa surface, mais en même temps il faut déployer une énorme force mécanique pour le mettre en mouvement. Et cette force évaluée en kilogrammètres reproduit le nombre indiqué plus haut comme représentant l'équivalent mécanique de la chaleur.

Par l'induction électrique.



Par le choc.

Toutes les fois qu'un corps en mouvement vient à choquer un autre corps il se produit de la chaleur, et tout le monde sait que sous les marteaux des forgeron le fer reste incandescent plus longtemps que s'il était abandonné à l'air libre. Les plaques des navires blindés, frappées par les boulets lancés à l'aide des énormes canons modernes, deviennent rouges de feu. Toute masse d'eau qui tombe dégage de la chaleur, et voilà pourquoi les eaux en mouvement gèlent moins facilement que si elles sont stagnantes. On croit communément que dans ces diverses cironstances le mouvement est détruit, tandis qu'il est réellement transformé en uue quantité de chaleur équivalente. Les moteurs hydrauliques fournissent le moyen de faire toucher du doigt, pour ainsi

dire, cette production de la chaleur par la pesanteur. On fixe le frein de Prony sur l'axe d'un de ces moteurs[1], lorsque la tenaille est libre, le levier avec le poids reste vertical et glisse sur l'axe; mais si on exerce une pression à l'aide des boulons, le levier est soulevé et se tient horizontal malgré l'action de son propre poids proportionnel à la masse d'eau qui tombe; or, pendant que ce travail s'accomplit sur l'axe, les mâchoires du frein sont fortement échauffées et prendraient feu promptement si on ne les maintenait pas mouillées d'eau froide. M. Joule ayant imaginé

Par le frein de Prony.

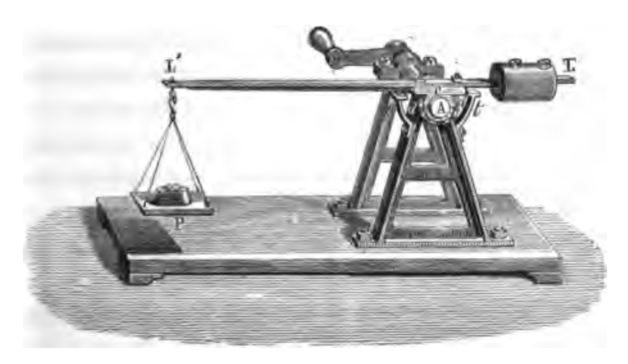


Fig. 3.

une disposition qui lui permettait de calculer dans cette expérience la quantité de chaleur en laquelle se convertissait la force mécanique, trouva une valeur très-sensiblement égale à celle indiquée plus haut.

[1] Ce frein consiste (fig. 3) en un levier LL' muni d'un coussinet *c* attaché sur l'axe du moteur A au moyen d'une chaîne *dd*, formée de pièces de tôle articulées les unes dans les autres, et garnies en dedans de plaques de bois qui s'appliquent sur la partie inférieure de l'arbre; cette chaîne est fixée au levier par des boulons et des écrous, de façon à former une espèce de tenaille qui peut enserrer l'axe du moteur; au levier est attaché un plateau P chargé de poids.

Les praticiens ont établi ainsi la théorie du frein de Prony. Lorsque le levier est en équilibre, il y a égalité des moments, c'est-à-dire des produits du levier l par son poids p et du frottement f par le rayon r de l'arbre. Ainsi $pl = fr$; d'où $2\pi pl = 2\pi fr$. Le second membre exprime le travail de la machine (résistance $f \times$ par le chemin parcouru $2\pi r$). Par conséquent, le premier exprime aussi la puissance de la machine. Mais ce travail de frottement dégage précisément la quantité de chaleur qui correspond à l'équivalent calorifique de la puissance; par conséquent, le nombre de calories produites sera égal au produit du nombre de kilogrammètres $2\pi pl$ par l'équivalent calorifique de 1 kilogramme $\frac{1}{425}$. On aura ainsi $\frac{2\pi pl}{425}$.

Expériences de M. Hirn.

Il était de la plus haute importance de déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur par des procédés dissemblables afin de reconnaître s'il conservait une valeur constante. M. Hirn a mis à profit le choc ordinaire des corps en faisant en grand un appareil ressemblant au pendule balistique employé dans les expériences sur le choc des corps. Les poids étaient : 1° une masse de bois pesante, suspendue horizontalement à des cordes verticales et nommée *bélier* ; 2° une masse de pierre suspendue aussi de la même manière et nommée *enclume*. Les deux poids étaient garnis d'armures en fer à leurs extrémités, et on plaçait entre eux une masse de plomb présentant une cavité dans laquelle on introduisait un thermomètre pour examiner la température avant et après le choc. Cet appareil permettait de calculer avec une suffisante exactitude la force vive de la chute et du rebondissement des deux poids, puis d'évaluer celle qui dans le choc s'était perdue, c'est-à-dire transformée en chaleur. Après plusieurs expériences de ce genre, on trouva pour l'équivalent mécanique de la chaleur le nombre 425 kilogrammètres.

Valeur de l'équivalent.

D'autres expériences sur la condensation des gaz, sur l'étirement du fer, sur le frottement de la fonte [1], etc., ont fourni une valeur de 432 kilogrammètres, et Zeuner, discutant tous ces résultats, adopta une valeur finale $A = 425$ kilogrammètres $=$ travail équivalent à une calorie. Donc, pour convertir en kilogrammètres un nombre n de calories C, ou réciproquement, on aura cette relation

$$nC = n\,425^{km}$$

et l'équivalent calorifique du travail d'un kilogrammètre sera $\frac{C}{425}$, d'où $n \times 1^{km} = \frac{nC}{425}$

Température.

En terminant, nous dirons que si le mouvement sensible de translation que possédaient les deux corps agissant mécaniquement disparaît, il y a nécessairement production d'un mouvement moléculaire invisible à la vérité, mais néanmoins parfai-

[1] Voyez dans Hirn, ouvrage cité, une longue liste des nombres obtenus. Les expériences faites sur l'eau soumise à de fortes pressions ont donné 433 kilogrammètres ; le choc des corps, 425. L'expansion des gaz a fourni pour limite inférieure 423 et pour limite supérieure 441,6. La vitesse du son permet aussi de calculer l'équivalent dynamique de la chaleur.

tement réel, qui constitue la température du corps Ce mouvement consiste en oscillations moléculaires très-petites qui constituent le calorique et déterminent en nous la sensation du chaud. Aucun corps n'est exempt de calorique, donc aucun n'est exempt de ces vibrations. Or une somme de ces vibrations constitue une véritable puissance mécanique, et celle-ci de même qu'elle peut être engendrée par un mouvement sensible, de même elle peut produire ce mouvement à la faveur d'une transformation convenable, ainsi que nous l'avons déjà vu. Avant tout il est bon de dire quelques mots relatifs à la température absolue.

Température absolue.

Nos thermomètres sont gradués d'après des températures conventionnelles. Le zéro centigrade correspond au phénomène physique de la fusion de la glace, et le centième degré à l'ébulition de l'eau sous une pression de 760 millimètres. Mais à ce zéro les corps ne sont pas dépourvus de chaleur, puisqu'ils peuvent être refroidis davantage. Toutefois on peut évidemment arriver à un point tel que les molécules ayant une force vive de plus en plus petite, celle-ci devienne nulle, alors on aura le zéro absolu. A quel degré correspond ce zéro?

Le procédé le plus rationnel pour le fixer, consiste à se baser sur l'expansion des gaz qui sont les corps les plus normaux et dans lesquels il ne paraît pas y avoir de résistances internes. Les gaz se dilatent de $\frac{1}{273}$ de leur volume environ pour chaque degré centigrade, en conséquence à 273° au-dessous du zéro thermométrique, leur volume n'existera plus ou tout au moins sera rendu insensible pour ce qui regarde la portion d'espace nécessaire à l'oscillation moléculaire qui serait partout éteinte. Ce point est le zéro absolu *théorique*. Je dis théorique, car il est probable qu'avant d'arriver à cette limite, la loi de la dilatation change, et dès lors à ce degré les espaces destinés aux oscillations moléculaires ne seront pas nulles. Néanmoins les physiciens admettent la valeur — 273° comme zéro absolu, et elle est acceptable dans les calculs de toutes les expériences dans lesquelles les gaz se trouvent dans les limites de leur dilatation normale. Nous verrons en effet que toute la thermodynamique se fonde sur ces dilatations supposées normales, et en dehors desquelles les formules calculées cessent d'être applicables

CHAPITRE IV

CONVERSION DE LA CHALEUR EN MOUVEMENT.

Phénomène réciproque du précédent.

La conversion du mouvement en chaleur ou, pour parler d'une manière plus générale, la production de la chaleur par le mouvement lorsque ce dernier cesse de se manifester sous sa forme ordinaire, est une notion avec laquelle notre esprit se familiarise sans difficultés, mais nous ne concevons pas aussi facilement la réciproque, c'est-à-dire une absorption de chaleur corrélative de toute production de mouvement. D'après l'ancienne théorie, la chaleur étant une substance, ne peut disparaître ; il est donc très important d'établir la réalité du fait par des expériences précises, et la solution de ce problème présente des difficultés de plus d'un genre.

Toutefois il n'est pas rare de voir la chaleur donner naissance au mouvement. Toutes les expansions et les dilatations produites par le feu sont des mouvements mécaniques ayant le calorique pour cause déterminante. Les dilatations de l'air et des corps solides, les explosions des poudres détonantes, et par-dessus tout la puissance gigantesque des machines à vapeur sont des effets de la chaleur. Là le calorique disparait et devient de la force mécanique. La difficulté du problème consiste donc à démontrer que dans ces phénomènes une *partie de la chaleur disparaît en produisant un travail et en donnant le mouvement à une masse.* La chose n'est pas facile vu la grande valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur ; puisque dans une machine ayant une force de six chevaux, la différence entre le condensateur et la chaudière, serait d'un degré centigrade pour ce travail. Comment donc estimer cela exactement, alors que les pertes reconnaissant une infinité d'autres causes sont tellement grandes que dans les meilleures machines on utilise à peine 12 0/0 de la chaleur totale?

Point à démontrer.

Rien d'étonnant à ce que l'on ne soit parvenu que tardivement à reconnaître la perte de chaleur produite par un travail accompli. La théorie enseignait, il est vrai, que si une quantité de cha-

leur ne disparaissait pas par le fait du travail, le mouvement perpétuel, dans le sens rigoureux du mot serait réalisable, mais qui peut avoir confiance aux raisonnements théoriques seuls.

Nécessité théorique de cette démonstration.

Cependant l'expérience a confirmé la théorie : Supposons une machine à vapeur arrivée à un régime uniforme, dans laquelle, par des moyens appropriés on puisse déterminer la température de la vapeur à son entrée dans le cylindre et à sa sortie dudit cylindre ; la connaissance de cette température suffira pour évaluer la quantité de chaleur contenue dans le gaz, et par suite les pertes qu'il a éprouvées en traversant la machine, sans qu'il soit nécessaire de savoir ni sa pressiòn ni son volume. Si le calorique reste en quantité constante, et s'il n'y a aucune absorption de chaleur pendant la production du travail, la vapeur après avoir servi à mouvoir le piston, pourra en se rendant dans des tubes et des récipients convenablement disposés être employée à échauffer d'autres corps, de même que l'aurait fait la vapeur arrivant directement de la chaudière. En d'autres termes, on retirerait de la vapeur d'abord tout son effet utile comme agent thermique, et de plus le travail mécanique qui serait par suite obtenu sans dépense de combustible. Ainsi on aurait le travail *gratis*. Or rien n'empêcherait que cette vapeur chaude, après avoir traversé un premier cylindre, s'introduisît dans celui d'un second moteur, par exemple pour vaporiser de l'éther ou du sulfure de carbone, substances très-volatiles et mettre en mouvement des machines avec cette vapeur, de sorte que l'on obtiendrait du mouvement indéfiniment ; le mouvement perpétuel deviendrait réalisable ; car le second moteur pourrait produire par le frottement la quantité de chaleur perdue par rayonnement dans les deux appareils, compenser ainsi les pertes accidentelles, et de plus, restituer autant de force que les frottements en absorbent. Chacun voit à présent l'absurdité de notre hypothèse. Après avoir résolu la question théoriquement, examinons-la expérimentalement et cherchons si la vapeur présente la même température à l'entrée et à la sortie du cylindre.

Résultat pratique.

Séguin d'abord, ensuite Hirn et Regnault démontrèrent que réellement il y a une perte de chaleur dans les circonstances précitées. Hirn, avec une machine à vapeur d'une force de 150 che-

vaux dans laquelle le travail restait uniforme, alors que les quantités de vapeur variaient de $0^k,345$ à $0^k,469$ par seconde, trouva une perte de 38 calories, abstraction faite des différences observées dans les diverses expériences : différences qui furent très-légères malgré les variations assez étendues de la quantité de vapeur qui traversait la machine dans des temps égaux. Dans une autre série de recherches, avec un moteur de 116 chevaux, il trouva une différence en moins de 29 calories. Enfin, avec une machine de 90 chevaux, la diminution fut trouvée de 20 à 21 calories, les quantités de vapeur variant de $0^k,190$ à $0^k,229$[1].

Regnault a repris et varié ces expériences. Dans une machine à vapeur fonctionnant à 5 atmosphères, sur 653 calories entrant dans le cylindre, il trouva qu'il s'en perdait 16, c'est-à-dire $\frac{1}{40}$; dans un autre 34, ou d'une manière générale $\frac{1}{20}$ de la quantité totale[2].

Utilisation des machines.

Ainsi le fait d'une perte de chaleur produite par le travail, ou effet mécanique d'une machine, est chose irrécusable. Il est difficile à la vérité de déduire de ces expériences le nombre représentant l'équivalent mécanique de la chaleur, mais la cause en est à la difficulté d'évaluer la *totalité* du travail mécanique fait par l'appareil. Si on se préoccupe de déterminer seulement une fraction de ce nombre et de conserver à cette fraction une valeur constante, on reconnaît *qu'elle est indépendante de la quantité de vapeur en circulation et seulement variable avec le travail produit*. La machine à vapeur utilise donc seulement une partie assez faible de la chaleur communiquée, mais la partie absorbée par le travail est suffisamment grande pour que l'on ne puisse l'attribuer ni aux simples pertes par rayonnement, ni aux erreurs inévitables dans de semblables expériences.

Cycle dans les machines.

La série des phénomènes produits par l'eau au sein d'un moteur à vapeur rend cet appareil très-propre à établir le rapport fixe existant entre les équivalents calorifique et mécanique. En effet, l'eau sous la forme liquide entre dans la chaudière, là elle se réduit en vapeur emportant avec elle une certaine quantité de

[1] Hirn, op. cit., p. 93.
[2] Regnault, *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXVI. p. 676.

chaleur, elle entre dans le cylindre et y perd une partie de ce calorique pour produire du travail mécanique, puis elle va au condensateur dans lequel, perdant le reste de sa chaleur, elle revient de vapeur eau liquide, enfin cette eau reprise par une pompe est ramenée à la chaudière. Le cycle des transformations n'altère pas la nature du fluide, ni ses propriétés chimiques, et étant donnée simplement la différence des tensions que possède la vapeur dans les diverses parties de son trajet, on peut évaluer la variation de température due à l'effet mécanique produit dans l'intérieur de la machine.

Les animaux sont de véritables machines à feu, par conséquent, sous certains rapports, ils doivent être soumis aux mêmes lois. Les expériences faites par Hirn sur lui-même et sur les autres montrent que, dans tous les cas où il se produit un travail dynamique, la respiration s'active davantage, et il se consomme une plus grande quantité d'oxygène; par suite la chaleur est dégagée en plus grande abondance. Cependant en mesurant la quantité de chaleur effectivement contenue dans le corps humain, on la trouve notablement moindre que celle produite par la combustion devenue plus intense. Hirn, dans une expérience, a constaté une différence en moins de 436 calories, 330 dans une autre, et, calculaut d'après les résultats de la première le travail effectif de la seconde, il trouva un accord satisfaisant entre le calcul et l'observation[1]. Réciproquement, si un homme descend une échelle, la quantité de chaleur renfermée dans son corps augmente, car au travail organique s'ajoute celui de la pesanteur.

Machines animales.

La machine à air chaud d'Ericsson démontre encore, par son mode de fonctionnement, la perte de chaleur accompagnant la production du travail mécanique. Cette relation est aujourd'hui la base de toute la théorie des moteurs animés par le feu.

Machines à air chaud.

Les corps gazeux, en vertu de leur énorme dilatabilité, se prêtent mieux que tous les autres au genre d'étude qui nous occupe en ce moment; un fait très-simple, mais assez concluant pour montrer que lorsque un travail s'accomplit, de la chaleur disparaît, est le refroidissement observé quand un gaz se dilate en se répandant dans l'atmosphère. Dans ce cas la masse gazeuse en

[1] Hirn, op. cit., p. 83, *Théorie mécanique de la chaleur*, t. I, p. 29 et 30.

se détendant doit soulever la pression atmosphérique et faire place ainsi au nouveau volume; elle accomplit donc un travail, lequel a lieu aux dépens de sa température. Ce fait est précisément le point de départ qui servit à Mayer pour établir la théorie mécanique de la chaleur.

Variation des solides.

On peut aussi vérifier cette loi sur les solides, mais d'une façon moins apparente, à cause de la faible variation de leur volume. Si par exemple à l'extrémité d'un fil métallique fixé à une pince thermo-électrique, on suspend un poids, on observera un abaissement de température consécutif à la dilatation produite; que l'on attende alors que le corps ait pris la température ambiante, pour enlever le poids, et aussitôt on constatera une élévation de température résultant de la condensation survenue. Si les deux opérations se font l'une après l'autre, la température semblera à peine changée, parce que la chaleur observée dans le premier travail est compensée par celle produite dans le second.

Rectification du principe de Carnot.

Carnot admettait comme principe fondamental que « toutes les fois qu'il y a transport d'une certaine quantité de chaleur d'un corps chaud à un corps froid, il se produit une quantité de travail équivalente, pourvu qu'il ne survienne aucun changement définitif dans l'état du corps servant d'intermédiaire; *et la quantité de chaleur en action reste constante.* » Mais autant la première partie de cette proposition est vraie, autant la seconde est fausse, car réellement *il disparaît une quantité de chaleur proportionnelle au travail accompli*, principe dont l'intelligence sera plus complète alors que nous aurons examiné à fond la parfaite correspondance des deux ordres de phénomènes.

CHAPITRE V

CONSÉQUENCES DES FAITS PRÉCÉDENTS. — INVARIABILITÉ DE L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR. — CONSTANCE DE RENDEMENT. — EFFET UTILE.

Travail intérieur et extérieur.

Les faits exposés jusqu'à présent démontrent que le mouvement détruit et le calorique dégagé ont entre eux la liaison intime de

la cause à l'effet, et qu'il existe un rapport unique et constant entre les quantités positives ou négatives de travail et les quantités de chaleur reçues ou perdues. Demandons-nous maintenant si cette liaison est telle que le mouvement disparu, en tant que mouvement de translation, puisse être regardé comme devenant mouvement vibratoire calorifique, et si cette transformation est complète. On ne peut se dissimuler que la chose n'est pas évidente au premier aperçu et qu'il est des cas dans lesquels il semble que la transformation ne soit pas complète. Pour nous rendre compte de ces difficultés, nous devons d'abord distinguer deux espèces de travaux pouvant être produits dans les corps par le calorique : un *travail extérieur* et un *travail intérieur*, ce dernier s'accomplit dans le corps lui-même. Si un gaz enfermé dans un cylindre se dilate et soulève en même temps un piston pesant, il accomplit ces deux genres de travaux. Le travail extérieur est l'élévation du poids, l'intérieur la dilatation, c'est-à-dire l'écartement des molécules du gaz. Ce second travail dans les gaz parfaits est minime ou nul, mais dans les vapeurs il est considérable, et dans les liquides et les solides il est beaucoup plus grand. Ce travail s'étend aux changements d'état comme liquéfaction et vaporisation, dans toutes ces opérations, le travail à faire est de surmonter les liens qui résultent de l'attraction moléculaire et par conséquent une portion de la force vive de la chaleur sera employée, et on devra évaluer la quantité de ce travail pour trouver un équivalent toujours constant entre la chaleur et l'effet mécanique. Or on voit que tout cela n'est pas facile à calculer et à expliquer.

Commençons donc par examiner ce qui se passe dans les variations de volume et de densité des gaz, pour trouver l'explication du froid produit dans leur dilatation, ce qui nous éclairera sur la question générale.

On a attribué autrefois ce froid à un changement de capacité calorifique dans le gaz, mais cette opinion n'est plus soutenable. Travail de dilatation.

1° Il est démontré par les recherches de Regnault que sous toutes les pressions, un même poids de gaz a sensiblement la même capacité pour la chaleur et que l'influence de la pression est très-faible. Cette loi est vraie pour les gaz dits parfaits ; pour les vapeurs, qui sont des gaz peu éloignés de leur point de liquéfac-

tion, elle souffre des exceptions, mais alors on peut évaluer la variation de la capacité calorifique. Parmi les gaz parfaits on en peut citer à peine trois, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote, encore doivent-ils être bien purs; sinon, ils sont soumis à des exceptions. Toujours est-il que dans les conditions normales *la capacité calorifique des gaz parfaits est la même à toutes les températures;* on ne peut donc pas expliquer le phénomène par une variation de capacité.

La source véritable de cette diminution est le travail que fait le gaz en soulevant l'atmosphère. Toutes les fois qu'un gaz se dilate sans faire aucun travail extérieur, sa température reste constante dans la masse totale. Cela a été prouvé par une expérience célèbre de M. Joule. Ce physicien renferma dans un récipient plein d'eau deux ballons formés d'un métal résistant; les deux ballons pouvaient communiquer ensemble à l'aide d'un robinet. Dans l'un, A,

Expérience de Joule.

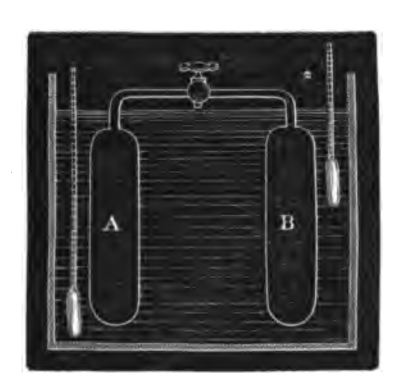


Fig. 1.

se trouvait de l'air comprimé à 10 atmosphères; l'autre, B, était vide. La température de l'eau était observée avec le plus grand soin. Le robinet étant ouvert, l'air se mit en équilibre de pression dans les deux ballons et la température de l'eau resta stationnaire. Ce fait analysé convenablement conduit à la proposition énoncée plus haut. En effet, en ouvrant le robinet, l'air du récipient A se dilate et se refroidit, comme on peut le voir en mettant seulement le ballon A dans l'eau. Mais si, dans le ballon B, l'air dilaté arrive à une basse température, cet air étant comprimé par celui qui continue à affluer en B, il se dégage alors une certaine quantité de chaleur. A la vérité, la masse d'air donnée éprouve en définitive une dilatation; il semble donc que finalement on devrait observer un refroidissement. Pourquoi donc la température reste-t-elle la même? La raison en est dans le travail mécanique

produit pendant le passage du gaz. Les molécules gazeuses sont d'abord lancées du premier dans le second ballon comme des projectiles qui, à l'origine du mouvement, ont une vitesse de 600 mètres par seconde : puis cette vitesse va sans cesse diminuant jusqu'à ce que l'équilibre de pression soit établi. Durant le passage du gaz il se produit un choc des molécules et une vibration qui doivent élever la température de B. L'air du ballon A fournit donc du travail produit aux dépens de sa propre chaleur ; ce travail est tel que l'orifice traversé par le gaz s'échauffe considérablement, Joule l'a prouvé par des expériences directes. Cette chaleur dégagée dans B se communique à la masse entière et l'échauffe de telle façon que, malgré le refroidissement qu'elle a éprouvé par le fait de la dilatation, la température ne change pas. Comme il n'y a aucun travail extérieur, la compensation est parfaite dans l'état final du système, et cependant, évidemment, dans les diverses parties, à un moment donné, l'état thermométrique a varié et l'équilibre complet ne s'est établi qu'après un certain temps. M. Cazin, à l'aide d'un ingénieux appareil, a réussi à rendre sensibles les variations de température spéciales à chacune des phases de l'expérience[1].

Expérience de M. Hirn.

L'expérience de Joule, répétée par Regnault, a réussi parfaitement ; cependant on pouvait objecter que la quantité de chaleur dégagée ou absorbée dans ces conditions était si faible qu'il était difficile de la mesurer ; M. Hirn pensa à transformer tout l'appareil en une sorte de thermomètre différentiel. Faisant usage d'un tube divisé en deux compartiments par une membrane ; à l'aide d'une pompe, il comprima l'air intérieur dans une des cellules d'une quantité égale à celle dont il le dilatait dans l'autre ; puis, la communication étant établie entre les deux espaces par la rupture de la membrane, et aussitôt un manomètre étant mis en relation avec l'appareil, il trouva que la température restait constante et que le manomètre indiquait une tension égale à celle observée avant le partage du gaz. On avait eu le soin d'attendre, avant de commencer l'expérience, que tout le système fût revenu à la température primitive et que la chaleur produite par la manœuvre de

[1] Voy. *Comptes rendus*, 9 mars 1868.

la pompe se fût dissipée; l'expérience fut faite d'une manière très-concluante, et les conditions étaient telles qu'on pouvait observer une variation de 0°,02 dans la température pour une différence de $\frac{1}{2}$ atmosphère.

Conclusion pour les gaz.

Ces expériences prouvent donc que pour les gaz parfaits la température finale de la masse reste la même si elle ne fait pas de travail extérieur. Cela ne veut pas dire que dans les différentes sections de l'appareil la température reste constante; mais si l'une augmente l'autre diminue d'une quantité égale, de sorte qu'à la fin il y a compensation. Cela se comprend facilement d'après la nature de la constitution des corps gazeux. Ces corps ont leurs molécules animées de vitesses très-grandes, et lorsqu'ils sont enfermés dans des récipients, les molécules subissent de nombreuses réflexions qui changent leur direction sans altérer la force vive dont elles sont animées; lorsqu'on leur ouvre un espace plus considérable elles n'ont qu'à progresser en ligne droite au lieu de lignes brisées, ce qui ne change en rien la condition de leur force vive.

Mais la chose se passera différemment si elles doivent vaincre une résistance, telle que soulever la pression atmosphérique directement ou soulever un piston chargé de cette même pression ou d'un poids additionnel; car alors leur force vive sera employée partiellement dans ce travail : ainsi on se rend compte de la disparition de chaleur dans les machines à gaz ou à vapeur. Dans ces cas, c'est la vitesse moléculaire qui devient vitesse de translation des masses plus ou moins considérables qui constituent la machine, d'où le travail ordinaire qu'elle devient capable d'accomplir.

Vu l'importance de ce sujet et pour mieux nous assurer que les choses se passent ainsi et que véritablement une partie du mouvement, animant le gaz comme chaleur, se transforme en travail, considérons la question à un point de vue plus simple, mais non moins exact.

Développement du résultat.

Supposons un cylindre imperméable à la chaleur, dans lequel un piston peut se mouvoir sans frottement. Ce piston est chargé d'un poids, la pression atmosphérique par exemple. Si, pour fixer les idées, nous supposons l'aire du piston égale à 1 mètre carré, la pression totale sera 10333 kilogrammes. Supposons enfin que

le volume d'air renfermé dans le cylindre soit 1 mètre cube, et que nous l'échauffions suffisamment pour en doubler le volume. Comme les gaz se dilatent de 0,00366 par 1° du thermomètre, il faudra élever la température à 272°,4. Alors le piston se sera élevé de 1 mètre et nous aurons produit un travail extérieur de 10333 kilogrammètres, plus le travail intérieur de la dilatation du gaz. Actuellement, si nous enlevons au gaz autant de chaleur que nous lui en avions donné primitivement, c'est à-dire 272°,4, il reviendra à sa température première ; disposons les choses de telle sorte que le piston descende en suivant le gaz dans sa condensation, sans exercer sur lui aucune compression par l'effet de son poids ; puis demandons-nous si, lorsque le volume de la masse gazeuse aura repris sa valeur première, la température et par suite la pression du gaz seront les mêmes après et avant l'expérience? La réponse est facile. Si toutes les circonstances se retrouvent les mêmes, on aura obtenu l'élévation d'un poids sans aucune dépense de force, résultat impossible. Donc la température sera moindre ; et en divisant tout le travail effectué par l'équivalent mécanique de la chaleur et par la capacité calorifique du gaz, on pourrait trouver le nombre de degrés dont la température doit s'abaisser. La température finale est de 205°,99 ; or 272°,85 — 205,°99 = 66°,66. Tel est donc le refroidissement éprouvé par le gaz pendant l'expérience[1]. On rendait compte autrefois de cette diminution de température par une augmentation de la capacité calorifique, mais l'inexactitude d'une telle explication est aujourd'hui démontrée, la capacité des gaz étant constante. Force est donc d'admettre que la quantité disparue est réellement transformée en travail.

Disparition de la chaleur par le travail.

Non-seulement l'expérience a établi l'équivalent du travail produit et du calorique absorbé, mais elle a encore prouvé que cette transformation ne dépend nullement de la matière intermédiaire employée, mais seulement de la quantité absolue de chaleur disparue. Je dis absolue, car cette quantité ne doit pas s'estimer d'après les températures ordinaires, mais d'après les températures comptées à partir du zéro absolu duquel nous avons déjà parlé.

Effet maximum de la chaleur.

Ici se présente une question. Pourrait-on, avec une machine parfaite, convertir *tout entière* une quantité donnée de chaleur en

[1] Hirn, *ouvrage cité*.

force mécanique? La théorie répond non; parce que même avec les meilleures machines possible, il y a un effet utile maximum que l'on ne peut dépasser. Cela deviendra évident si on examine le cycle des opérations que doit effectuer la substance véhicule de la chaleur pour produire l'effet mécanique.

Supposons une machine parfaite, c'est-à-dire dans laquelle il n'y ait aucune perte, ni par rayonnement, ni par contact; aucun travail inutile, aucune élévation de température qui ne soit nécessaire. Quelle que soit la substance intermédiaire, elle sera toujours soumise aux phases suivantes : La substance intermédiaire est prise à une température déterminée T_0 et par l'aide du feu est élevée à une température T_1, à ce degré elle entre dans une nouvelle période pendant laquelle elle se transforme en vapeur et augmente de volume et de pression tant dans le récipient qui sert de chaudière que dans celui qui sert de cylindre destiné au mouvement du piston; tout en restant pendant un certain temps à une pression constante, même lorsque le piston se meut dans le cylindre, parce qu'alors une nouvelle quantité de vapeur se forme dans la chaudière et remplit l'espace laissé libre. Puis on intercepte la communication avec la chaudière, et la substance se détend en vertu de sa propre élasticité. Dans cette troisième période et pendant une partie de la précédente, la substance fait un travail et s'abaisse à T'. Si les choses restaient ainsi, la machine ne pourrait continuer son travail, et le premier coup de piston achevé, elle s'arrêterait. Pour continuer le travail, il faut faire une des deux choses suivantes, ou perdre dans l'atmosphère le fluide qui a travaillé en perdant toute la chaleur qu'il contient, c'est-à-dire $T_1 - T'$ avec une perte réelle de force vive, ou condenser ce fluide sous un moindre volume et faire une opération contraire à celle qui se passe dans la chaudière.

Le premier cas est celui des machines à haute pression et présente des avantages pour certaines conditions de la pratique alors qu'on ne regarde pas à sacrifier une portion de la force motrice pour obtenir d'autres avantages; mais ordinairement, dans les machines dites à basse pression, on a recours à la seconde méthode, c'est-à-dire que l'on condense la vapeur. Supposons que cela ait lieu suivant le procédé mis en usage dans certaines machines,

c'est-à-dire à l'aide d'un condensateur tubulaire fermé et refroidi extérieurement; alors la même quantité de liquide sera constamment mise en circulation. On pourrait aussi obtenir un semblable résultat dans les machines à air chaud, grâce aux ingénieux systèmes de toiles métalliques imaginées depuis peu.

Donc la quatrième opération que subira la substance intermédiaire sera une condensation accompagnée d'un refroidissement, autrement dit un travail négatif qui ramènera la vapeur au volume du liquide primitif et à la température T_0 de laquelle il était parti. Après cela le liquide sera repris et reporté dans la chaudière pour recommencer le même cycle. 4e opération.

Dans le cycle de ces opérations, on voit que la perte de chaleur par l'effet utile de la machine sera représentée par tout le calorique soustrait dans la quatrième période et communiqué nécessairement à la substance réfrigérante. A la vérité, ce calorique pourra être employé à d'autres usages, mais pour la partie dynamique de la machine il est perdu. L'effet maximum sera donc obtenu quand l'abaissement de T' à T_0 est insensible, ce qui aura lieu quand la vapeur se détend jusqu'à la température du condensateur, auquel cas on a $T'=T_0$.

Si donc nous nommons L_1 et L_0 les travaux potentiels correspondant aux températures T_1 et T_0 nous aurons :

$$L_1 = \varepsilon Q_1 \qquad \text{et} \qquad L_0 = \varepsilon Q_0,$$

et l'effet utile maximum sera

$$L_1 - L_0 = \varepsilon Q_1 - \varepsilon Q_0.$$

Nommons F le rapport entre cette quantité et la quantité de travail L_1 que peut produire la quantité de chaleur primitive on aura

$$F = \frac{L_1 - L_0}{L_1}.$$

C'est là ce que l'on nomme le *coefficient économique de la machine*. Coefficient économique.

Or, en supposant que les quantités de chaleur soient proportionnelles aux températures absolues (c'est-à-dire comptées à partir de 273° au-dessous du zéro ordinaire) on aura :

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{\varepsilon Q_1}{\varepsilon Q_0} = \frac{L_1}{L_0}.$$

D'où

$$\frac{L_1 - L_0}{L_1} = \frac{T_1 - T_0}{T_1},$$

et finalement

$$F = \frac{T_1 - T_0}{T_1}.$$

Effet maximum.

C'est-à-dire que le coefficient économique de la machine sera exprimé par le rapport de la différence des deux températures extrêmes de la machine à la température maximum à laquelle a été porté le fluide intermédiaire; par suite l'effet maximum en travail pouvant être obtenu sera

$$L_1 - L_0 = 425 L_1 \frac{T_1 - T_0}{T_1}.$$

Le facteur $\frac{T_1 - T_0}{T_1}$ ne peut devenir égal à l'unité qu'en supposant $T_0 = 0$ c'est-à-dire en le faisant égal au zéro absolu, ou bien en supposant qu'avec le travail il ne se perde pas de chaleur. La première hypothèse est pratiquement impossible, la seconde est théoriquement absurde. Donc même l'effet utile maximum ne sera jamais égal à toute la chaleur employée à échauffer la masse.

Mais cet effet utile maximum dépendant de la différence des deux températures, on voit qu'avec les températures élevées on peut approcher de la valeur absolue plus qu'on ne le peut avec de moindres températures. Malheureusement il se présente alors d'autres inconvénients sérieux que nous n'avons pas à énumérer ici.

De cette discussion il résulte que dans la pratique on ne peut avoir un effet utile supérieur à 50 pour 100. Toutefois en raison des pertes par rayonnement, de celles résultant d'une conductibilité imparfaite, et de la grande quantité de chaleur que l'on doit employer pour mettre en mouvement le courant d'air qui alimente la combustion, et qui sert à éliminer les produits de cette combustion, la quantité de chaleur réellement utilisée est $\frac{1}{17}$ ou $\frac{1}{18}$ p. 100 en théorie, et en pratique elle n'atteint pas 5 ou 6 p. 100.

Pour calculer l'effet utile de la machine il ne faut donc pas prendre la quantité absolue de la force vibratoire calorifique, mais

celle que la machine peut produire relativement à la valeur du coefficient $L_1 - L_0$, chercher davantage serait chercher la création de la force avec rien. Pour éclaircir ce sujet supposons une machine brûlant un kilogramme de charbon par heure et par cheval, dont la chaudière est à 5 atmosphères soit à 150° degrés, le condensateur étant à 60° : cette machine fera un travail de $75^{km} \times 1$ heure $= 75 \times 60^m \times 60^s$ avec une dépense de 7500 calories, nombre que produit la combustion d'un kilogramme de charbon. Divisant le travail par le nombre de calories on a $\frac{75 \times 3600}{75 \times 100} = 36$. C'est-à-dire que l'on utilise seulement 36 kilogrammètres par calorie. Or, suivant la théorie, une calorie doit donner 425 kilogrammètres, donc on n'utilise que $\frac{36}{425} = \frac{1}{11,8}$ de la valeur totale, la perte est donc énorme. Exemple pratique.

Toutefois cette perte n'est pas tout entière de la faute de la machine, mais elle dépend du système et des températures auxquelles on travaille. Pour s'en convaincre il suffit de calculer la valeur de F qui devient pour une calorie Q

$$L_1 - L_0 = 425 \frac{(273° + 120) - (273° + 60)}{273 + 120}$$
$$= 425 \frac{1}{6,5} = 66 \text{ environ.}$$

Nous avons vu que la machine n'utilise que 36 donc

$$\frac{66}{36} = \frac{100}{x},$$
$$x = 54 \text{ environ.}$$

La machine utilise donc 54 p. 100 de ce qui est utilisable, elle n'est donc pas aussi mauvaise qu'elle paraît dans le principe, puisque quelques moteurs hydrauliques nous donnent le même effet utile. Il est évident que l'on peut améliorer les conditions de la machine à vapeur, mais qu'il ne faut pas en espérer autant que nous le promettent quelques ignorants. Effet utile.

Nous avons voulu entrer dans ces détails qui du reste se rattachent à la deuxième proposition fondamentale de la thermodynamique pour dissiper certaines idées erronées sur ce sujet, et ne pas encourager des tentatives inutiles qui au fond aboutissent à cher-

cher le mouvement perpétuel. Maintenant nous abandonnons toutes ces études aux praticiens, nous tenant seulement dans la limite de la théorie générale relative à la constitution physique des corps.

CHAPITRE VI

EXAMEN DES TRAVAUX QUE LE CALORIQUE ACCOMPLIT DANS LE CORPS.

Malgré tout ce que nous avons dit, la conception de la transformation du calorique en travail mécanique est encore aujourd'hui obscure pour un grand nombre de personnes, qui, par suite, répugnent à l'admettre. Essayons de rendre cette notion aussi claire que possible.

Comparaison entre la chaleur et le son.

Nous évaluons les températures par la dilatation des corps, et même nul autre moyen est à notre disposition; d'autre part nous évaluons le travail mécanique en kilogrammètres : entre ces deux quantités, comment établir une relation? Pour résoudre cette difficulté à l'aide d'un exemple familier, supposons que nous nous proposions d'estimer l'équivalent mécanique des vibrations sonores dans une cloche frappée avec un marteau d'une masse connue et tombant d'une hauteur donnée. La *force mécanique* du marteau s'évaluera à la manière ordinaire, par le poids multiplié par la hauteur, d'où la *force vive*, mais comment apprécier celle de la vibration sonore? On pourrait mesurer l'amplitude d'une partie du corps vibrant, par exemple en observant les mouvements d'un rayon lumineux réfléchi par un petit miroir fixé au corps sonore, procédé déjà employé par Lissajous dans ses expériences sur les diapasons. Cette façon d'opérer serait très-exacte, et nous aurions ainsi facilement un coefficient de transformation d'un des mouvements dans l'autre, nous trouverions ainsi qu'un certain nombre de kilogrammètres employés à la percussion correspond à un certain nombre de millimètres dans l'amplitude de la vibration. Le rapport ainsi calculé peut représenter l'équivalent mécanique du son. Certainement il n'y a pas identité ni de mesure ni de nature entre ces deux élé-

ments, et cependant il est hors de doute que l'un est lié à l'autre non-seulement par la relation de la cause à l'effet, mais aussi par le principe de la transformation des mouvements qui trouve ici une de ses applications les plus évidentes. A l'Exposition de l'industrie à Paris en 1855, il y avait une immense cloche soutenue par un système de supports qui en rendait le mouvement si facile, que, malgré sa masse, un seul homme suffisait pour la maintenir en mouvement, mais sans la faire sonner. L'homme qui montrait la cloche portait aux nues l'ingénieux mécanisme et aurait voulu le voir mis en usage dans tous les clochers, pour épargner la fatigue aux sonneurs. Un ecclésiastique, bon géomètre, qui se trouvait dans la foule, dit qu'il voudrait bien voir la même expérience, mais en faisant sonner la cloche. Tous les assistants ne comprirent pas la différence, et moins encore que tous les autres celui qui faisait l'éloge de la machine. Si l'expérience avait été faite, on aurait trouvé une grande différence : la cloche frappée par le battant pendant sa descente éprouve par cela même une perte de mouvement, une portion de la vitesse acquise dans la chute est détruite par le choc, et dans la seconde moitié de sa course elle ne remonte pas à la hauteur qu'elle atteindrait si elle oscillait à vide, car dans ce dernier cas les seules résistances à vaincre seraient les frottements. La force vive perdue dans le choc est transmise à l'air et transformée en ce mouvement vibratoire qui produit le son, ou, pour parler plus simplement, est *transformée en son*.

De même les dilatations thermiques produites par les vibrations moléculaires peuvent servir à évaluer la force mécanique qui les produit et réciproquement. En effet la dilatation thermométrique mesure évidemment l'intensité des vibrations moléculaires ; et celles-ci sont reliées à la force mécanique, de telle façon que non-seulement le rapport entre ces deux éléments est constant, mais encore la destruction de la vibration entraîne la production de la force ; en un mot on peut admettre une véritable transformation. Cette transformation réciproque est aujourd'hui une connaissance vulgaire, et l'on en tire parti pour expliquer un grand nombre de phénomènes naturels. De plus, l'histoire de la science nous apprend que le problème de la nature du calorique a pris

Confirmation historique.

naissance dans la théorie de la chaleur rayonnante et dans les analogies des ondulations lumineuses et calorifiques avec celles du son ; privée de cet appui, la seule notion de l'équivalent mécanique n'aurait pas suffi pour donner une idée claire du phénomène que l'on nomme la chalenr des corps.

Toutefois cette comparaison établie entre le son et le calorique, considérés tous deux comme des mouvements vibratoires, a été poussée trop loin par quelques physiciens lorsqu'ils ont envisagé les sons produits par certains corps chauds dans des circonstances particulières comme un effet de vibrations calorifiques[1]. On dépasse les limites d'une induction légitime si dans ce cas on admet un effet direct, car les sons dont nous parlons sont tellement graves, qu'ils supposent des vibrations immensément plus lentes que celles animant les molécules dans les vibrations calorifiques. Il faut regarder ces sons comme des effets secondaires résultant soit de la dilatation de l'air interposé, soit de mouvements inégaux dans les corps mis en contact ; l'un d'eux se dilatant pendant que l'autre se contracte, ces alternatives produisent un sautillement et par suite une vibration sonore. Quelle que soit l'explication adoptée, les sons ainsi produits prouvent que les molécules des corps sont dans une grande agitation. A la vérité, ce mouvement moléculaire n'a jamais été mis en doute, pas même par les physiciens qui admettaient le feu pénétrant dans les corps sous forme de corpuscules ignés (*igniculi*) comme au temps de Galilée et d'Huygens[2].

[1] Les expériences de ce genre sont assez simples : une médaille en cuivre chauffée avec une lampe à alcool, puis placée sur une enclume ou sur une autre masse d'un métal élastique produit un son. On réussit aussi avec des corps d'une autre forme, et l'expérience est aujourd'hui parfaitement connue.

[2] Galilée, *Science nouvelle*, dialogne I, p. 15, édit. de Bologne, 1655. — Huygens, *De lum.*, loc. cit. plus haut.

Les vibrations acoustiques sont comprises entre 30 et 50 000 par seconde, les vibrations lumineuses commencent à 63 trillions pour finir à 946 trillions par seconde. Un intervalle immense semble donc séparer les deux genres de mouvement; mais, en réalité, il n'en est rien. En effet, en dehors des sons compris dans l'échelle harmonique, certaines ondes envoyées par les corps vibrants, quoique frappant l'oreille par successions régulières, sont impuissantes à exciter la sensation d'un son musical. Nous entendons alors des bruits de diverse nature, des bruissements, des crépitations; à ces vibrations succèdent les oscillations calorifiques obscures dont il est très-difficile d'apprécier l'étendue, et finalement l'agitation moléculaire s'exaltant toujours, la rapidité du mouvement devient telle que les ondes engendrées impressionnent la rétine; à ce moment apparaissent les radiations lumineuses.

En résumé, l'examen combiné des phénomènes du calorique rayonnant et de l'équivalent mécanique de la chaleur nous montre manifestement le calorique comme un simple mouvement vibratoire des molécules. La mesure de l'intensité de ces vibrations se déduit de la dilatation produite, en d'autres termes, du travail accompli par elles ; par suite, on considère la température comme variant en raison de la force vive du système. Cette vibration moléculaire quelquefois n'est pas vraiment oscillatoire, mais devient un violent mouvement de projection ; tel est le cas des gaz. Dans toutes les théories, les molécules gazeuses sont regardées comme animées d'une force répulsive ou d'une expansibilité en vertu de laquelle elles choquent fortement les corps qui leur font obstacle. Par suite, on doit admettre que dans ces chocs elles perdent une partie de leur force en la communiquant aux corps qui, libres de céder à leur pression se mettent en mouvement ; d'où abaissement de température et diminution de la force expansive d'un gaz lorsqu'il produit un travail quelconque. C'est cette vitesse absolue des gaz qui constitue leur force expansive, par opposition avec les solides et les liquides dans lesquels les molécules n'ont qu'un mouvement oscillatoire. Tout changement soit de vitesse absolue dans les gaz, soit d'intensité dans le mouvement vibratoire dans les autres corps demande une force vive en plus ou en moins selon la quantité de travail positif ou négatif dont le corps est le siége. Conclusion.

Nous devons maintenant examiner ces travaux, car le physicien ne se contente pas de ce qui suffit au praticien, c'est-à-dire d'envisager le calorique comme une force abstraite en se basant sur le principe d'équivalence, il lui faut examiner en outre la qualité du travail accompli dans les corps. Analyse des travaux exécutés.

La chaleur qui pénètre dans un corps quelconque est employée à produire trois effets ou travaux bien distincts :

1° Elle l'échauffe ;

2° Elle surmonte les résistances intérieures ;

3° Elle produit un travail extérieur s'il y a lieu.

1° La quantité de chaleur employée au premier travail se détermine d'après la quantité nécessaire pour élever la masse *unité* du corps à 1° de température. Soit K cette quantité, que l'on nomme 1° Échauffement.

capacité absolue; si le corps passe de t_0 à t_1, supposant $t_1 > t_0$, nous aurons la quantité de chaleur absorbée q représentée par

$$q = K(t_1 - t_0).$$

Cette valeur, étant une quantité absolue, doit rester constante pour un même corps, quel que soit son état, car elle dépend seulement de l'inertie des molécules et de l'accroissement de force vive qu'elles acquièrent, laquelle est rigoureusement proportionnelle à la température, en faisant abstraction de toutes les autres réactions.

2° Dilatations. 2° La seconde partie de la chaleur employée est occupée à surmonter les résistances intérieures, et elle accomplit des travaux de plusieurs genres : (*a*) elle triomphe de la cohésion en dilatant les corps et (*b*) en les amenant quelquefois à l'état liquide, et même (*c*) à l'état gazeux. Ainsi les dilatations et les changements d'état sont des travaux accomplis par cette autre portion de la chaleur interne. Indiquons par R les résistances intérieures et par dV les augmentations de volume. La somme de tous ces travaux sera $\int R dV$. Or chaque résistance intérieure est assimilable à une pression que la chaleur doit surmonter. Si nous faisons A = l'équivalent calorifique du kilogrammètre, c'est-à-dire $\frac{1}{425}$; tous ces travaux seront effectués par une quantité de chaleur

$$q' = A \int R dV = A\Lambda,$$

Λ représentant le travail moléculaire.

Lorsque, dans une opération inverse, le corps reviendra à l'état duquel il était parti, cette quantité de chaleur sera restituée tout entière. Ici a lieu l'application du principe général des forces vives : que toutes les fois qu'un système de points qui s'attirent ou se repoussent en vertu de forces exprimables par des fonctions de leurs distances revient aux mêmes conditions de position, il se trouve avoir la même force vive. La dilatation du corps en tant qu'elle est contre-balancée par l'attraction moléculaire peut être comparée à l'action d'une planète sur un corps placé à sa surface, ou à un satellite qui circule autour de la planète. Pour soulever

ce corps ou dilater l'orbite du satellite, il faut faire un travail, dépenser une énergie. Les choses restant dans le nouvel état produit par ce travail, l'énergie semble disparue, mais elle est passée réellement à un état virtuel ou potentiel, et s'il est permis au corps de revenir à sa place primitive, il restitue en tombant l'énergie actuelle qu'on avait dépensée dans le premier travail. De même un corps dont la masse a subi un travail qui l'a soit volatilisé, soit fondu, etc., sera capable de restituer ce même travail dépensé en revenant à son état primitif.

3° Travail extérieur.

Enfin, dans certains cas, le corps chauffé accomplit un certain travail extérieur ; il soulève un poids, un piston chargé de la pression atmosphérique, par exemple, etc. Représentons par p la pression dont nous parlons, et par dV l'augmentation de volume ; nous aurons la quantité de chaleur équivalente au travail total nécessaire au corps pour passer de V_0 à V_1, exprimée par

$$q'' = A\int_{V_0}^{V_1} p dV = AP.$$

Donc, la quantité de chaleur totale qui, dans un corps, à la fois échauffe la masse, fait un travail intérieur et un travail extérieur est donnée par la formule :

$$Q = K(t_1 - t_0) + AA + AP. \qquad (a)$$

Dans le cas d'un travail extérieur nul, les deux premiers termes de l'expression précédente doivent être seuls conservés, et leur somme représente la chaleur x que l'on doit, dans les conditions ordinaires, appliquer à un corps pour l'échauffer à un degré donné, l'élévation de température s'accompagnant ordinairement d'un travail intérieur ; cette quantité de chaleur est la *capacité calorifique ordinaire*.

Capacité à pression constante et à volume constant.

Lorsque le corps subit une augmentation considérable de volume, comme il arrive pour les gaz, il faut distinguer deux chaleurs spécifiques : l'une à *pression constante*, et l'autre à *volume constant*. Cette dernière est précisément ce qui est compris dans le terme $K(t_1 - t_0)$; elle exprime la force vive qu'on doit appliquer aux molécules pour élever la température, en supposant le gaz renfermé dans un récipient à parois inextensibles et imperméables à la chaleur, auquel cas la pression augmente.

Mais d'ordinaire on échauffe les gaz en leur permettant de se dilater, et dans ce cas la pression reste constante, comme cela arrive lorsque le gaz chauffé soulève un piston. Alors le gaz exécute réellement un travail AP. Ainsi la chaleur spécifique à pression constante et à volume variable sera plus grande de toute cette quantité de travail nécessaire.

Si on appelle α le coefficient de dilatation, v le volume, p la pression, le travail exécuté sera

$$A\alpha pv,$$

et la chaleur totale à communiquer sera pour un degré centigrade

$$q' = K + A\alpha pv.$$

L'expérience confirme ce résultat, et les quantités K et q' sont entre elles comme 1 : 1,40 à peu près. La dernière équation peut fournir la valeur de A, lorsqu'on connaît les deux capacités. C'est ainsi que Mayer détermina le premier cette quantité qui est la réciproque de l'équivalent mécanique de la chaleur.

La variation de volume dans les solides et les liquides étant très-faible, on peut négliger le travail du soulèvement de la pression atmosphérique ; mais, au contraire, dans ces corps on a à tenir compte de travaux intérieurs assez considérables, ce qui complique extrêmement les phénomènes. Ce sont ces travaux intérieurs qui ont donné naissance à l'idée de la chaleur latente. Il nous faut maintenant les étudier.

Lois limites. Nous chercherons l'influence des pressions internes sur les lois acceptées jusqu'à présent touchant les échanges de chaleur. Nous verrons que ces lois sont sensiblement modifiées et que la plupart d'entre elles sont des *lois limites*, vraies théoriquement, mais qui appliquées aux corps tels que nous les connaissons sont inexactes à cause des perturbations qu'elles exercent les unes sur les autres. Les lois de Gay-Lussac et de Mariotte s'appliquent exactement aux gaz parfaits, c'est-à-dire à ceux dans lesquels le travail intérieur est nul ; elles supposent les températures mesurées d'une façon absolue et non rapportées à un zéro purement conventionnel ; enfin les volumes eux-mêmes ne doivent pas être estimés d'après les volumes apparents, mais d'après les volumes compris entre les

atomes. Du reste, la destinée de ces lois a été assez singulière et en tout comparable à celle des lois qui régissent le mouvement elliptique des planètes. Ces dernières, trouvées à l'aide de données imparfaites, ont conduit au principe de la gravitation universelle, et les astronomes, en développant les conséquences de ce principe, ont reconnu que le mouvement des planètes n'était en réalité jamais rigoureusement elliptique.

Nous suivrons, dans notre étude des phénomènes thermiques, la marche indiquée par l'évolution historique de la question. Nous dirons :

1° Comment les corps ont été envisagés jusqu'ici au point de vue de leur état physique ;

2° Comment nous devons les concevoir d'après les théories modernes ;

3° Quelles modifications ces idées nouvelles apportent aux lois acceptées sans conteste jusqu'à ces derniers temps.

CHAPITRE VII

IDÉE GÉNÉRALE DES DIVERS ÉTATS DES CORPS DANS LA THÉORIE DYNAMIQUE DE LA CHALEUR. — DE L'ÉLASTICITÉ. — CORPS GAZEUX.

La théorie la plus généralement acceptée jusqu'à ce jour par les physiciens sur la nature des corps est ainsi exposée par Poisson[1] : Théorie ancienne.

« Toutes les parties de la matière sont soumises à deux espèces d'actions réciproques : une attractive, indépendante de la nature des corps, proportionnelle au produit des masses et en raison inverse du carré des distances ; son action s'étend jusqu'à l'infini dans l'espace, et elle produit tous les phénomènes d'équilibre et de mouvement étudiés dans la mécanique céleste ; l'autre est attractive ou répulsive, elle dépend de la nature des molécules et de la quantité de calorique qu'elles renferment ; son intensité décroît très-rapidement quand la distance augmente, et son action devient

[1] *Journal de l'École polyt.*, 20e cahier, p. 4.

insensible, lorsque la distance est à peine perceptible. Les corps sont formés de molécules séparées, c'est-à-dire de portions de matière pondérable, d'une grandeur inappréciable, séparées par des espaces vides ou pores dont les dimensions sont imperceptibles à nos sens. Les molécules sont tellement petites et voisines l'une de l'autre, qu'une portion d'un corps qui en renferme un nombre extrêmement grand peut cependant être supposée extrêmement petite et son volume insensible... Indépendamment de la matière pondérable dont elle est formée, chaque molécule renferme en outre une certaine matière impondérable à laquelle on attribue la production des phénomènes de chaleur... La quantité de calorique répandue dans le vide doit être considérée comme insensible en comparaison de celle qui reste adhérente aux molécules matérielles, puisque d'après les expériences de Gay-Lussac, en diminuant ou en augmentant rapidement le volume d'un espace vide, il n'y a aucune variation de température. »

De plus, le calcul des forces attractives a montré que l'attraction exercée sur une molécule quelconque par toutes les autres molécules d'un corps, peut-être considérée comme formée de deux composantes : la première est l'action de la masse totale ; elle resterait la même si, le corps considéré avait la forme sphérique, ou si toute sa masse était réunie au centre de gravité ; la seconde dépend de la distribution de la matière elle-même, et varie nécessairement avec la forme du corps. Cette dernière produit les actions secondaires qui se manifestent seulement aux plus petites distances ; c'est elle qui, d'après les physiciens, déterminerait l'état solide et cristallin des corps. Quand, par la dilatation, les molécules se sont éloignées, ces actions cessent d'être sensibles, et l'attraction et la répulsion sont en équilibre : alors le corps est liquide, et finalement, devient gazeux lorsque la force répulsive du calorique est prédominante.

Théorie moderne.

Telle est la façon d'expliquer l'état physique des corps dans la théorie admise jusqu'à présent qui considère le calorique comme une substance. La doctrine de la matérialité du calorique étant abandonnée, il faut nécessairement admettre un principe à l'aide duquel on puisse expliquer la production des phénomènes attribués à la force répulsive, et ce principe ne sera autre que le

mouvement vibratoire ou translatoire des molécules du corps lui-même. Quant à l'attraction moléculaire, nous conserverons, pour le moment, ce mot comme expression d'un fait, mais nous verrons à en donner l'explication en temps convenable, et nous montrerons alors comment cette attraction peut, elle aussi, prendre son origine dans le mouvement. Actuellement bornons-nous à remarquer que Poisson insiste sur l'absence complète de manifestations calorifiques dans le vide, fait très-favorable à la nouvelle théorie; car il est évident que si la matière manque on ne peut la trouver en mouvement[1]. Il reste donc à exposer comment nous devons concevoir le mouvement intérieur des corps.

Force répulsive des gaz due au mouvement.

L'expansibilité indéfinie des gaz conduit naturellement à l'idée que leurs molécules sont douées d'un mouvement de projection, et que, par suite, elles sont dans un état continuel de répulsion réciproque. Ce mouvement de projection résulte d'un choc éprouvé par les molécules, et celles-ci le conservent indéfiniment en vertu de leur inertie quand elles se trouvent dans un espace libre, alors elles se dilatent indéfiniment; mais dans les récipients fermés elles se heurtent réciproquement et vont choquer les parois qui les renferment.

Dans ce conflit moléculaire, si les molécules matérielles étaient privées de toute force intérieure, leur mouvement s'éteindrait, et elles se réuniraient les unes aux autres, comme le font les atomes des corps durs, suivant les mécaniciens. Aussi les auteurs de cette théorie, Clausius et d'autres, ont-ils attribué aux molécules une certaine élasticité en vertu de laquelle elles peuvent rebondir lorsqu'elles choquent leurs voisines ou les parois des vases, de cette façon elles peuvent conserver toute leur force vive; mais cette élasticité étant du genre des forces secondaires produites par d'autres forces primordiales, il est évident que, s'il est possible d'admettre son existence dans une molécule composée, on ne peut faire de même quand il s'agit des atomes

[1] Il n'est pas facile de comprendre comment Gay-Lussac a pu exécuter ses expériences d'une manière concluante : car employant des pistons ou autre moyen, il y aurait eu toujours des frottements, et par là de la chaleur en jeu. Balfour, Stuart et Tait ont prétendu trouver de la chaleur produite par la rotation d'un disque dans le vide : la cause de ce phénomène est encore mystérieuse, et le fait peu certain. Dans ce cas, la chaleur pourrait bien provenir de l'induction magnétique terrestre sur le corps en rotation.

Élasticité due à la rotation.

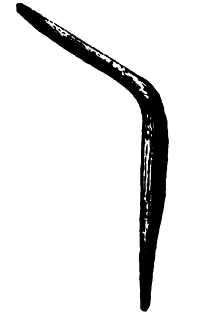
élémentaires. En effet, l'élasticité, conçue d'après les idées acceptées, suppose un espace vide dans l'intérieur de la molécule qui change de forme en se comprimant, pour revenir ensuite à sa figure première ; or, nous regardons les atomes comme impénétrables, et non comme des réunions de particules solides, par suite ils ne peuvent renfermer des espaces vides leur permettant dilatation et contraction. A la vérité, ce que nous appelons molécule d'un gaz *simple*, c'est-à-dire *chimiquement indécomposable*, n'est pas un atome élémentaire, ou, tout au moins, peut ne pas en être un. Alors cette molécule gazeuse étant un agrégat de véritables atomes, il se peut très-bien qu'elle ait des pores intérieurs, et, en général, un certain nombre de propriétés qui n'appartiennent pas à ses atomes constitutifs ; il n'est donc pas absurde de la supposer douée d'élasticité. Huygens a admis cette hypothèse pour l'éther. A son avis, les particules éthérées sont composées d'autres plus petites ; mais en examinant les choses à fond, on voit que de cette manière on recule la difficulté sans la résoudre. Nous croyons pouvoir montrer qu'il n'est aucunement nécessaire d'accepter une semblable élasticité comme force primitive, et que la répulsion apparente des atomes et leur collision réciproque peuvent être rapportées simplement à un mouvement qui leur serait propre, pour cela il suffit de les supposer en rotation. Prouvons-le.

Théorèmes de Poinsot.

Parmi les beaux théorèmes découverts par Poinsot sur la théorie du choc des corps en rotation, se trouve celui relatif à leur *réflexion* contre un obstacle résistant. Il nous apprend que par la seule rotation un *corps dur* et *non élastique* peut rebondir absolument comme un corps parfaitement élastique ; il y a mieux : un de ces corps, lancé contre un obstacle fixe, est souvent renvoyé avec une vitesse supérieure à sa vitesse initiale. Le subtil géomètre fait remarquer comment ce phénomène, paradoxal en apparence, est dû à la transformation d'une partie du mouvement rotatoire en mouvement de translation ; d'où il résulte une augmentation de la vitesse du centre de gravité. D'après les théories ordinaires du choc, dans lesquelles on ne tient aucun compte du mouvement de rotation, la proposition précédente est absurde, et cependant elle est parfaitement établie. Ainsi, à côté des cas de *réflexion*

ordinaire se trouvent les phénomènes de *progression* ; pour employer l'expression de Poinsot, on pourrait aussi les appeler *réflexions négatives*.

Dans la réflexion négative, après le choc, le centre de gravité du corps revient en avant avec une vitesse supérieure à celle qu'il possédait d'abord[1]. Ces questions forment une branche toute neuve et très-intéressante de la mécanique ; elles se démontrent facilement en composant les deux mouvements de rotation et de translation, considérés par rapport aux centres de gravité, de rotation et de percussion, et on arrive facilement à comprendre que, d'une *façon générale*, on puisse dire : un choc, quel qu'il soit, ne peut annihiler en même temps dans un corps les deux mouvements de rotation et de translation ; car si le choc est excentrique, il pourra détruire la rotation et non la translation, et si la direction du choc passe par le centre de gravité, il pourra anéantir la translation, mais non la rotation. Ainsi, la quantité de mouvement perdue d'un côté sera gagnée de l'autre : la rotation pourra être ou changée de sens ou simplement accélérée, selon le point du corps qui sera frappé ; d'où la notion des centres de *conversion*. On rencontre des exemples de réflexion succédant au choc de corps en rotation, dans le mouvement des disques lancés par les discoboles, dans celui des galets lancés sur l'eau de façon à former des ricochets, dans les chocs imprimés aux toupies pendant leur rotation, etc. Les joueurs de billard savent parfaitemsnt combien la rotation des billes modifie les lois du choc des corps élastiques établies dans les traités élémentaires.


Fig. 5.

Exemples.

Les sauvages de l'Australie, avec leur boomerang, obtiennent de remarquables mouvements de rétroversion. L'arme ainsi nommée est faite d'un morceau de bois en forme de 7 allongé, un peu mince mais long (fig. 5). Ce trait, lancé d'une certaine manière, prend un rapide mouvement de rotation en décrivant

[1] Voyez Poinsot. *Questions dynamiques sur la percussion des corps*, p. 21 et 29 du mémoire tiré à part, et aussi le journal de Liouville. On doit donner une très-grande attention au beau théorème qui lie tous les centres de gravité, de rotation, de réflexion, de percussion et de conversion (page 56).

sa trajectoire dans l'espace, frappe l'objet qu'on s'était proposé d'atteindre, et si le coup a été bien dirigé il revient tomber aux pieds du guerrier qui un instant avant le projetait à travers les airs. Bien plus, sans rencontrer aucun obstacle, le boomerang est souvent renvoyé par le seul effet de la résistance de l'air, et on peut facilement réaliser en petit dans une chambre un phénomène de ce genre en faisant usage d'un morceau de carton taillé suivant la forme indiquée ci-dessus.

Application aux gaz.

Cela posé, il est bien naturel d'attribuer aux molécules des corps un mouvement le plus général possible : c'est-à-dire de les supposer animées simultanément de *rotation* et de *translation*. De cette manière, on comprendra certains phénomènes dont rendaient difficilement compte les hypothèses admises jusqu'ici. En effet, à bien examiner les choses, l'élasticité seule, avec les propriétés qu'on lui accorde ordinairement, ne suffit pas pour expliquer complètement les phénomènes de la propagation de la chaleur. Un mouvement excité dans un milieu élastique, c'est-à-dire composé de molécules élastiques, ne peut jamais *revenir en arrière*, à moins qu'il ne rencontre un corps étranger faisant obstacle ou qu'il ne survienne en un certain point du milieu propagateur une variation de densité. Ce mouvement produit une onde toujours progressive. Or les choses ne se passent pas ainsi pour le calorique : si l'on tient pendant un certain temps une source de chaleur en contact avec l'extrémité d'un tube horizontal plein de gaz, ou d'une barre métallique, le mouvement calorifique se propage suivant la longueur, et, si on éloigne la source, l'extrémité échauffée continuera à présenter une température plus ou moins élevée. Le phénomène ne sera pas le même que celui observé sur une colonne d'air ou une verge métallique mises en mouvement par un corps vibrant placé à une de leurs extrémités : cette partie revient au repos aussitôt le corps excitateur éloigné, ainsi que cela doit arriver dans un milieu doué seulement de la faculté de propager les mouvements à la manière des milieux élastiques.

Donc, pour la chaleur, il y a un mode spécial de transmission de mouvement, dans lequel le mouvement peut revenir en arrière et se communiquer dans tous les sens ; et il semble que

ce mode de propagation ne soit autre que celui qui, dans les mouvements rotatoires, est dit transmission par *progression*, ou encore par *conversion*.

En effet, les molécules étant animées de rotation, lorsqu'elles se rencontreront elles rebondiront après le choc soit positivement, soit négativement, car leurs deux mouvements de rotation et de translation ne se détruiront pas de telle sorte qu'elles puissent rester accolées l'une à l'autre. Mais il n'en sera plus ainsi lorsque la rencontre aura lieu suivant l'axe de rotation : si l'axe est permanent les mouvements s'entre-détruiront et les molécules se réuniront ; si l'axe n'est pas permanent[1] la juxtaposition des particules matérielles n'est plus nécessaire, mais elle est possible. Mais si nous considérons les nombreuses conditions auxquelles doivent satisfaire les corps en rotation pour rester collés ainsi, nous pouvons dire que la probabilité de leur réunion est infiniment petite.

Ces considérations sur la neutralisation des mouvements moléculaires jettent un jour tout nouveau sur le difficile problème de la constitution intime des corps. Un exemple éclaircira notre pensée.

Supposons un cas extrême, c'est-à-dire le choc de deux atomes doués seulement de translation, ou bien encore, se heurtant de telle façon qu'ils ne peuvent rebondir. Évidemment ces deux atomes resteront unis ensemble de même que ceux des corps nommés *durs* par les mécaniciens, et ils formeront un système animé du mouvement de translation, résultant des deux

Cas d'adhésion.

[1] Dans les traités de mécanique, on distingue deux cas dans le mouvement de rotation : ou bien l'axe autour duquel tourne le corps passe toujours par les mêmes *points physiques*, et alors il est dit *permanent*, ou bien il passe d'une série de points à une autre, et on le nomme alors *axe non permanent* ou *instantané*. Un gyroscope, maintenu dans une situation fixe, tourne autour d'un axe qui, physiquement, est toujours le même; il présente un axe permanent. Lorsqu'un corps lancé à travers l'air pirouette sur lui-même, son axe change à chaque instant. Ainsi la terre, en vertu de son inertie, devrait avoir un axe de rotation permanent; mais, à cause de l'action perturbatrice exercée par le soleil et la lune sur la protubérance équatoriale, son axe n'est pas rigoureusement permanent, et on trouve que le pôle vrai décrit chaque jour un cercle excessivement petit de $0^m,14$ de rayon autour du pôle moyen. Ce déplacement n'étant nullement appréciable à nos procédés de mesure, car il n'atteint pas un centième de seconde, les astronomes n'en tiennent pas compte, et dans les déterminations des latitudes on considère ces quantités comme nulles; autrement dit, l'axe est supposé permanent.

autres. Ce système pourra agir comme un corpuscule unique d'une masse double ou triple, en général multiple de celle d'un atome simple, suivant que deux, ou un plus grand nombre d'atomes, se sont réunis de cette manière. Nous avons là un exemple manifeste d'un agrégat d'atomes liés les uns aux autres, non par l'influence d'une attraction quelconque, mais par la simple inertie, et ce groupe présentera une certaine cohésion ; car, pour le détruire, il faudra une force étrangère capable de surmonter l'inertie des atomes formant la molécule ainsi composée.

Nous ne prétendons pas rendre compte de la cohésion par les seules considérations qui précèdent, mais ces remarques font entrevoir un moyen très-simple d'expliquer certaines circonstances de l'adhérence des molécules matérielles. Avant d'aller plus loin, il est utile de distinguer les uns des autres les divers assemblages d'atomes. On doit admettre :

Distinction des groupes atomiques.

1° Les atomes *isolés* et *primitifs*, qu'il serait bon d'appeler exclusivement les *atomes* ;

2° Les groupes *multiples* d'atomes. Ils peuvent être de forme plus ou moins compliquée. On pourrait les nommer *molécules élémentaires;* peut-être par leur mode différent de groupement donnent-ils naissance aux différentes espèces de substances chimiquement indécomposables jusqu'à présent, et appelées *corps simples ;*

3° La réunion de ces molécules élémentaires forme les molécules des composés chimiques qui, pour la rigueur du langage, doivent être désignées sous un nom spécial ; on peut les appeler *molécules chimiques*, ou si l'on veut, *hétérogènes* ; il faut donc comprendre que l'hétérogénéité résulte plutôt de la diversité de l'arrangement des atomes que d'une véritable diversité de nature, et cela pour des raisons que nous exposerons plus loin ;

4° Finalement l'assemblage des molécules homogènes ou hétérogènes produit les *parcelles* des corps qui, réunies suivant certaines lois que nous citerons, peuvent donner naissance aux *molécules intégrantes* des cristallographes.

Sans nous astreindre à employer toujours les expressions précédentes avec la signification précise que nous venons de leur don-

ner, nous nous conformerons à ces distinctions autant que faire se pourra, et surtout chaque fois que la clarté du discours l'exigera.

En résumé, dans les corps gazeux, il n'est pas nécessaire d'admettre d'autres forces répulsives que celles résultant du *mouvement moléculaire*, car elles permettent d'expliquer les phénomènes d'élasticité et d'expansibilité.

Par suite, on peut se dispenser de supposer dans la matière des forces répulsives ; ancienne hypothèse dont la moindre difficulté était d'assigner à quelles limites ces agents mystérieux cessent leur action pour permettre au principe antagoniste, c'est-à-dire à l'attraction, d'exercer la sienne.

Objection à l'ancienne théorie.

En effet, comment ne pas être arrêté par la contradiction suivante ? Aucun corps ne résiste sans se décomposer à un accroissement indéfini de température ; il devient d'abord liquide, puis il arrive à l'état gazeux, et enfin il se résout en ses principes élémentaires. Or, tandis que la force thermique présente une intensité aussi considérable en agissant à de très-petites distances, son action devient tout à fait nulle si les distances sont grandes, et même lorsqu'elles sont si minimes qu'elles sont inappréciables rien n'indique que cette force soit sensible. Cette propriété n'est pas en relation avec celle de la force antagoniste, l'attraction, car celle-ci sous le nom de gravitation continue à agir à des distances considérables.

Ce fait inexplicable dans les anciennes théories, si ce n'est en admettant des limites arbitraires, devient simple dans la théorie mécanique ; toute répulsion cessant nécessairement à la limite où cesse la collision moléculaire, celle-ci devant s'éteindre à la limite des excursions moléculaires. Dans les gaz ces limites sont fort étendues, mais dans les liquides et les solides elles sont certainement très-restreintes, car l'excursion est mesurée par la distance d'une molécule à sa voisine.

Explication de la pression hydrostatique.

Les fluides, et spécialement les fluides élastiques, présentent certaines propriétés mécaniques qui sont caractéristiques de leur état et dont on doit rendre raison dans toute théorie. Exemple la *pression hydrostatique*. Or il n'est pas difficile de montrer comment une semblable pression doit se produire dans un milieu

ayant la constitution attribuée par nous aux gaz, c'est-à-dire formé d'atomes dans une continuelle agitation.

En effet, un tel milieu, non-seulement doit être indéfiniment expansible, mais il doit encore exercer une pression égale dans tous les sens, pression qui constitue la *tension* gazeuse. Pour le prouver, supposons que la violence de la collision, ou la somme des molécules qui s'entre-choquent, soit moindre dans un point que dans un autre : les molécules rencontreront dans cette direction une moindre résistance, et dès lors il y aura afflux de matière en ce point, conséquemment accélération de mouvement. Ainsi le mouvement intérieur tend vers un régime uniforme, vers une égalisation d'intensité, d'où il résulte une sorte *d'équilibre dynamique* dans lequel toutes les parties du milieu sont animées d'une vitesse égale et développent dans le choc un travail en proportion de leur force vive, qui est égale pour toutes les molécules ayant une même masse. Par là nous aurons une pression égale en tout sens. Cette pression ne serait plus à proprement parler un phénomène de statique, mais de dynamique résultant de l'égalité de choc entre les molécules de la masse gazeuse et les molécules des parois qui sont elles-mêmes en mouvement de vibration, borné par les forces qui limitent la surface du récipient et le constituent à l'état propre des solides.

La température dépend de la force vive.

En résumé, d'après la théorie dynamique de la chaleur, la température dépend de la quantité d'action ou de force vive renfermée dans chaque molécule : autrement dit, chaque molécule étant animée d'une certaine vitesse, l'intensité de son choc devient la mesure de sa température. Il en résulte que l'équivalent mécanique de la chaleur étant un nombre assez élevé, la quantité d'action ou force vive contenue dans un gaz est énorme ; bientôt nous en chercherons l'expression numérique. Dans cette manière de voir, le passage de la chaleur d'un corps à un autre devient une simple communication de mouvement, et si l'équilibre de température tend sans cesse à s'établir, la raison en est dans la tendance du mouvement calorifique à se répandre uniformément dans la masse entière, particularité sur laquelle nous nous sommes expliqué plus haut. La communication de cette force vive à un corps, ou seulement son augmentation dans ce corps, peut résulter d'un

effet mécanique ou d'une réaction chimique ; mais, dans tous les cas, on observe que le corps dont l'énergie est la plus grande cède une partie de sa force vive à celui qui en possède une moindre quantité. Il en est exactement de même dans les communications de mouvements. Donc, si un gaz est mis en contact avec un corps dont la force vive soit moindre que la sienne, il lui donnera une partie de sa propre énergie, et par suite de cette perte, l'amplitude des excursions moléculaires diminuera. Le contraire arrivera si les conditions sont inverses.

Tous les mouvements précédents supposent le cas d'un gaz parfait. Un tel gaz serait celui dans lequel les molécules seraient parfaitement libres de toute influence de ces forces que nous nommons attractions moléculaires, quelle que soit du reste leur origine. Alors seulement lorsque deux molécules viennent se choquer, elles peuvent se séparer immédiatement sans aucun retard ni diminution de force vive; mais si ces molécules ne sont pas des simples solides géométriques, mais se trouvent, soit groupées ensemble, soit environnées d'une atmosphère d'autre matière plus atténuée, le cas sera différent, et les molécules entrant dans les sphères des autres en subiront l'influence. Cependant une telle pénétration peut avoir lieu sans aucune diminution de force vive dans la molécule circulante lorsque les phases de l'accès sont complétement égales à celles du recès. Imaginons (fig. 6) une molécule *a* entourée d'une atmosphère *n p k* : sans la présence et l'action de celle-ci la molécule *m* allant en ligne droite pourrait aller frapper une molécule en *k*, mais par l'action de l'atmosphère environnante elle parcourra la courbe *mnapq* et choquera ainsi la molécule centrale *a*, après quoi elle sortira de la sphère allant de nouveau en ligne droite. Si la branche *n a*, est égale à la branche

Gaz imparfait.

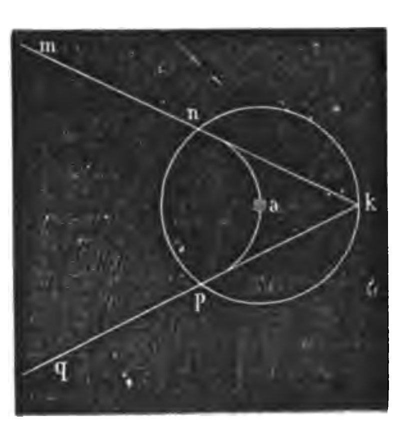


Fig. 6.

ap la marche de la molécule ne sera en rien changée. Mais si en traversant l'enveloppe de la molécule elle doit faire un travail, la courbe *a p* sera différente de l'autre et il y aura une perte de force vive. Un tel travail pourra consister en une transformation de mouvement de translation, en mouvement de rotation, ou en un changement de disposition des particules dans la sphère traversée, ou en un travail sur la matière éthérée qui les environne. Dans ces cas le gaz ne pourrait plus présenter les propriétés des gaz parfaits et les augmentations de température communiquées aux gaz ne seraient plus proportionnelles à l'augmentation d'énergie employée, et par là la dilatation ne serait plus proportionnelle à la température. Le coefficient de température serait alors variable.

L'observation confirme tout cela : car à l'exception de l'hydrogène et des composants de l'air atmosphérique dans lesquels ce coefficient est constant, pour les autres gaz il est variable comme l'a démontré M. Regnault. La loi de Mariotte et celle de Gay-Lussac alors ne sont qu'approchées. Dans un tel cas au lieu des pressions simples p, p' mesurées, il faut dans la loi substituer $p+R$, et $p+R'$, R et R' étant des quantités inconnues qui expriment les résistances intérieures à vaincre. Et au lieu des volumes v et v' on devra considérer les volumes V et V' occupés par les gaz faisant la soustraction du volume ψ occupé par les molécules matérielles du gaz ; ainsi la forme complète de la loi sera, selon M. Hirn [1],

$$\frac{R'+p'}{R+p} + \frac{V-\psi}{V'-\psi} \times \frac{T'}{T}.$$

Zéro absolu. Dans le cas où le gaz sera parfait et le volume ψ des molécules très-petit par rapport à V, et R sensiblement nul, la loi de Gay-Lussac redeviendra applicable. De là nous pouvons conclure que dans les gaz pour lesquels cette loi se vérifie, ces molécules sont vraiment très-petites en proportion des volumes occupés. M. Clausius a calculé que le volume des sphères doit alors être inférieur à $\frac{1}{1000}$ du volume total occupé par le gaz : et à plus forte raison le volume occupé par les molécules intérieures aux sphères doit être encore plus petit.

[1] *Théorie mécanique de la chaleur*, 2e édition, 1re partie, p. 224.

C'est alors seulement qu'en se servant de la loi de Gay-Lussac on peut calculer la valeur du zéro absolu de température dont nous avons parlé. Car posant le volume du gaz

$$v = v_0(1 + \alpha t),$$

α étant le coefficient de dilatation, en abaissant la température t au-dessous du zéro ordinaire jusque $a - tn = \frac{1}{\alpha}$ nous aurions

$$v = v_0\left(1 - \alpha\frac{1}{\alpha}\right) = v_0(1 - 1) = 0,$$

c'est-à-dire il aurait un volume nul, ou plutôt il n'y aurait plus aucune force expansive. Comme pour les gaz les plus parfaits, pour l'hydrogène par exemple $\alpha = 0.003665$, ainsi on trouve $tn = -273°$. C'est là ce qu'on appelle le zéro absolu dont nous avons déjà parlé. M. Clausius a encore cherché à évaluer la vitesse probable dont sont animées les molécules à une température déterminée : bien que ce résultat soit un peu hypothétique, nous le rapporterons ici. A la température de la glace fondante on trouve Vitesse moléculaire des gaz.

pour l'azote. . . . . 492 mètres par seconde.
pour l'oxygène 461
pour l'hydrogène . . . . 1844 mètres[1].

L'énergie du mouvement de translation serait à l'énergie totale (y compris la force de rotation), comme 0.6315 à 1.

Parmi les nombreux résultats dépendant, de la théorie mécanique des gaz, et qui servent à éclairer cette même théorie, nous nous bornerons à indiquer ceux obtenus par Graham dans ses expériences sur la diffusion et par Joule avec l'air traversant des trous très-petits. La vitesse de l'écoulement a été trouvée en raison inverse des racines carrées des poids atomiques. Or, si la force vive représente la température, pour deux gaz à température égale supposant P et P′ les poids atomiques, V, et V′ les vitesses respectives nous aurons Diffusion des gaz.

$$Pv^2 = P'v'^2, \quad \text{d'où} \quad \frac{v}{v'} = \frac{\sqrt{P'}}{\sqrt{P}},$$

[1] Dans les protubérances solaires nous avons constaté une vitesse de 90,5 kilomètres par seconde. M. Joung l'aurait constatée jusqu'à 430 kilomètres, mais ces vitesses ne sont qu'une petite fraction de celle qui est due à la température solaire.

[2] Clausius, *Mém.*, XIV, vol. II, p. 216.

mais dans les gaz les densités spécifiques sont proportionnelles aux poids atomiques ; nous aurons donc

$$\frac{v}{v'} = \frac{\sqrt{d'}}{\sqrt{d}},$$

cette loi explique pourquoi avec le diffusiomètre de Graham on peut séparer des gaz mélangés ayant une différente densité spécifique, car les quantités des gaz sortants seront plus grandes pour les gaz plus légers. Ainsi l'hydrogène étant 16 fois moins dense que l'oxygène il en sortira un volume $=\sqrt{16}=4$ fois plus grande que celui du gaz plus lourd. Les vitesses avec lesquelles les gaz sortent des orifices peuvent être considérées comme la continuation des vitesses qu'ils ont à l'intérieur de la masse, et par là elles seront indépendantes des pressions extérieures, mais dépendront seulement de la température.

Objection. On pourrait objecter que si telle est la vitesse des gaz, laquelle est peu différente de celle avec laquelle ils se répandent dans le vide, on devrait voir leur mélange s'effectuer dans un temps très-court. Or l'observation prouve que cette diffusion
Solution. et ce mélange se fait assez lentement. La réponse à cette difficulté a été donnée par M. Clausius, qui a calculé la probabilité de rencontre d'une molécule gazeuse avec les autres dans le milieu au sein duquel elle se diffuse. Il a trouvé cette probabilité très-considérable, de sorte que, à cause des chocs fréquents, son mouvement ne se fait que par des voies très-détournées et par cela très-lentement. Ainsi on explique les formes des veines gazeuses telles qu'on les observe dans les flammes ordinaires et dans une foule de phénomènes produits par les jets gazeux.

Machines à gaz. La théorie des gaz a conduit à la construction de machines dans lesquelles un gaz chauffé est l'unique moteur. Ces machines, vu la haute température nécessaire à leur fonctionnement seraient les plus utiles, mais en pratique il y a des difficultés considérables. Leur volume très-considérable, la destruction prompte qui se produit dans leurs organes à cause de ces mêmes températures sont des obstacles sérieux et qui détruisent, économiquement parlant, leurs avantages sur les machines à vapeur ordinaires.

Les gaz comprimés peuvent servir comme moteurs, et, cela est bien connu, on a employé l'air comprimé dans le percement du mont Cenis pour mouvoir les perforatrices de Sommellier. La pression n'était que de 5 atmosphères. L'air comprimé est dès lors devenu un moyen précieux pour transmettre la puissance à de grandes distances, alors que les autres moyens seraient impossibles. Cependant il ne faut pas se faire illusion : une perte de force très-considérable accompagne cette transmission, et ce mode ne peut être utile que lorsque l'on a à sa disposition des forces considérables ne coûtant rien qui peuvent compenser largement les frais de transmission. Gaz comprimés.

La source de cette perte est inhérente à la nature des gaz. Par la pression les gaz s'échauffent, et la partie de la force motrice ainsi transformée en chaleur se disperse inutilement, et à la détente que le gaz comprimé subit au moment du travail, cette partie ne peut se restituer : de là une perte considérable. On a constaté que le maximum d'effet utile s'obtient avec une compression lente, de sorte que la force vive développée et la chaleur soient le moindre possible. On évalue que pratiquement la perte s'élève à 40 pour 100 de la force primitive. Mais qu'est-ce que cette perte lorsqu'on peut profiter d'un torrent inutile développant une force de plusieurs millions de chevaux qui seraient tous perdus? Avec le temps, ces torrents deviendraient une source de prospérité pour les villes industrielles, et l'industrie ne serait plus obligée à se renfermer dans les gorges affreuses des montagnes.

Les principes exposés ici servent à l'explication des phénomènes observés dans les étoiles filantes et les bolides. Il est connu maintenant que ces traînées brillantes sont produites par la combustion de masses provenant des espaces célestes et tombant sur la terre. Leur vitesse selon les calculs de M. Schiaparelli est comprise entre 16 et 72 kilomètres par seconde, selon qu'elles suivent la direction de notre globe ou marchent en sens contraire. Une telle vitesse est immensément supérieure à celle que se trouvent avoir les molécules des gaz atmosphériques, celle-ci étant inférieure à 500 mètres par seconde. Il en résulte donc que la masse produit dans le trajet une espèce de tube vide, et qu'elle comprime fortement Application aux aérolites.

l'air en avant le portant à une densité énorme, et produisant ainsi un immense travail qui détruit sa force vive. M. le comte de Saint-Robert a prouvé que : supposant un aérolite sphérique ayant un décimètre de rayon et un poids de 14 kilogrammes avec une vitesse de 16 kilomètres, arrivant à la région de l'air où la pression est de $0^m,012$, la vitesse du météore se trouve réduite à 1597 mètres seulement, après avoir développé 446 850 calories. Que si le projectile a une vitesse initiale à l'entrée de 72 kilomètres, arrivé à ladite couche sa vitesse sera réduite à 1403 mètres en développant 9 114 736 calories : perdant dans le premier cas $\frac{10}{11}$ de sa vitesse et $\frac{50}{51}$ dans le second. Ainsi la perte principale de vitesse se fait dans les premières couches les plus élevées de l'atmosphère, et là où la pression est un seul millimètre les vitesses sont déjà réduites à 4871 et 5105 mètres, et les chaleurs développées 408 556 et 9 072 360 calories. Il en résulte que la chaleur développée est capable de volatiliser la plus grande partie de ces corps, qui ne pourront arriver à terre que dans le cas de masses énormes. L'atmosphère nous sert ainsi de véritable cuirasse pour nous protéger contre cette formidable artillerie intra-planétaire[1]. Aussi est-il probable qu'une grande partie des plus petits cratères lunaires ont été creusés par ces pierres provenant des profondeurs de l'espace.

A la température de l'atmosphère.

Un autre phénomène non moins important est expliqué par les principes de la thermodynamique : c'est la distribution de la chaleur dans notre atmosphère. Sa température est régulièrement décroissante malgré les agitations énormes qui se produisent dans son sein, circonstance qui, à première vue, semblerait devoir produire à la longue une température uniforme. Mais il n'en est pas ainsi, toute masse d'air transportée de bas en haut doit se détendre et par le travail qu'elle fait dans cette dilatation, en soulevant les couches supérieures, elle se refroidit : *vice versa*, si l'air descend, les couches supérieures diminuent de volume, l'air est condensé, et par ce travail il se trouve échauffé. Ainsi, malgré les remous qui existent continuellement dans l'atmosphère, la température des couches à une hauteur définie change

[1] Saint-Robert, *Thermodynamique*, p. 330, 2e édition.

très-peu, sans cela, une masse descendant de 5 kilomètres de hauteur, présenterait une variation de température de 30°; ce qui entraînerait une destruction épouvantable des êtres vivants à la surface de la terre, car une petite fraction de cette différence de température produit les grêles et les orages les plus désastreux.

Les masses d'air qui, transportées par les vents, passent du nord au sud se condensent, car elles passent de régions de parallèles plus grands à des régions de parallèles moindres, et *vice versa*, pour celles qui vont du sud au nord. De là d'énormes variations barométriques dans le nord et de très-faibles variations à l'équateur, de là aussi les températures amenées par les vents du sud toujours plus élevées que celles amenées par ceux du nord, même en faisant abstraction de la température propre des pays d'où ils partent.

Tous ces phénomènes étaient autrefois inexpliqués ou rapportés à des variations dans la capacité des gaz, ou à des effets de chaleur latente. De telles explications étaient absurdes. Tous ces phénomènes ne sont que des conséquences naturelles des principes de la thermodynamique, de sorte que, comme le dit M. Hirn, grâce à ces vues nouvelles, la météorologie est enfin entrée dans une voie rationnelle et véritablement physique.

CHAPITRE VIII

DE L'ÉTAT SOLIDE ET LIQUIDE. — FORCES RÉPULSIVES DANS LES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

L'état des corps dépend de la température.

Il est admis dans la science comme fait fondamental que, par une soustraction progressive de chaleur, tout corps gazeux se convertit en liquide, puis en solide. Les exceptions peu nombreuses qui nous sont offertes par les gaz permanents, ne prouvent rien autre, si ce n'est que le point de liquéfaction de ces gaz est inférieur à la plus basse température obtenue par nos moyens artificiels. Tout abaissement de température entraîne un affaiblissement correspondant du mouvement intérieur, et une diminu-

tion de ce dernier doit produire un rapprochement moléculaire, car l'impulsion étant moindre, l'amplitude de la vibration moléculaire décroît, et alors peuvent entrer en action les pressions exercées par les forces attractives ou par l'impulsion des parties environnantes, celles-ci étant pondérables ou impondérables. Il est évident que, par des déperditions successives, la vitesse moléculaire se trouvera diminuée à un tel point, que la molécule ne pourra plus sortir de la sphère d'activité de ses voisines, et alors elle sera obligée d'osciller suivant une courbe fermée plus ou moins régulière. Alors cessera le mouvement d'expansion, le corps deviendra liquide, et la gravité trouvant les molécules privées de mouvement de projection et animées d'une vitesse qui n'est pas supérieure à celle qu'elle peut leur imprimer, exercera une action prépondérante ; aussi le système prendra une surface de niveau sous l'influence presque exclusive de la gravité[1]. Mais, à la surface libre, les molécules ne sont pas soumises à une attraction égale dans tous les sens; elles pourront donc s'isoler, obéir aux forces de projection et passer à l'état gazeux; ainsi s'explique l'évaporation des liquides et de plusieurs solides.

Liquides. Dans les liquides les axes de rotation sont probablement dirigés de tous les côtés, ou bien encore ils peuvent être de position instable. De plus, la distance des molécules est telle que l'une n'affleure qu'à peine la sphère d'activité de l'autre, autant qu'il est nécessaire pour équilibrer la gravité. Ainsi toutes les forces étant en équilibre, les molécules céderont à la plus légère impulsion et posséderont la mobilité caractéristique des fluides.

Solides. En continuant à enlever de la chaleur à un corps liquide, c'est-à-dire à diminuer la vitesse des molécules, il arrivera que leur rapprochement étant encore plus considérable, les unes pénétreront dans la sphère d'activité des autres. Alors les attractions s'exerçant dans des directions dépendant de la forme des molécules, celles-ci tendront à s'orienter et se disposeront régulièrement, pour former un corps solide tout en perdant leur première liberté. Dans la théorie dynamique, l'existence de ces attractions comme forces primitives n'étant point admise, la théorie des di-

[1] L'atmosphère terrestre elle-même a été considérée par Poisson comme un liquide à sa limite supérieure, où la force expansive est équilibrée par la gravité.

vers états de la matière est basée également sur la diminution des distances intramoléculaires, mais elle est différente.

Nous avons dit plus haut : à la suite du choc de plusieurs atomes, il peut arriver que ceux-ci prenant un mouvement commun, contractent une adhérence analogue à celle que l'on rapporte habituellement à la cohésion. Les veines liquides nous présentent un exemple remarquable de cette adhérence moléculaire : au sortir d'un orifice, elles offrent l'aspect d'un solide, continu, précisément parce que toutes les molécules sont animées d'une vitesse égale ; et lorsque cette vitesse est considérable, par exemple dans les jets qui sortent des récipients sous de très-hautes pressions, on constate non-seulement par la simple vue, mais même par le toucher, que les veines liquides sont rigides et résistantes comme si elles étaient formées d'un tout cohérent. A notre avis, ce seul principe ne suffit pas pour expliquer les phénomènes de la cohésion. La mécanique intérieure des corps, pour être complète, demande encore des développements. Bornons-nous à dire maintenant que les faits exposés jusqu'ici n'excluent l'idée ni d'une action exercée sur les molécules par les forces dites attractives, ni d'une pression extérieure agissant sur elles et produite par l'éther interposé entre les atomes, et même il ne serait pas impossible qu'une semblable pression fût la véritable cause de la cohésion dans les corps composés. Cette opinion n'est pas aussi neuve ni aussi étrange qu'elle peut le paraître à première vue. Galilée croyait la chose explicable par cette considération que le vide est impossible[1] ; cette manière de voir évidemment était erronée, parce que le vide signifiait ici le vide d'air. Mais aujourd'hui de récentes découvertes ayant démontré l'existence d'un milieu beaucoup plus subtil et plus étendu que l'atmosphère, nous pouvons au moins nous demander s'il ne pourrait pas contribuer à un tel effet. Comme nous devons traiter longuement ce sujet un peu plus loin, nous nous contenterons d'en donner ici un aperçu.

Forces attractives.

Toute molécule pondérable, en tournant rapidement autour de son axe, et frappant tout autour, doit produire dans l'éther environnant

Leur origine dans la théorie actuelle.

[1] *Dialogues de la Science nouvelle*, journée I, p. 14. — Grove, *Corrélation*, p. 175.

une dilatation du milieu que pour abréger nous appellerons un tourbillon, d'un rayon très-petit, mais égal à celui nommé rayon de sphère d'activité moléculaire, elle doit donner ainsi naissance à une diminution de pression, que l'éther voisin tend à équilibrer. Si la vitesse de la masse vibrante surpasse celle de la lumière, nous aurons un vide éthéré, absolu ; mais pour produire une diminution de pression convenable et capable de produire les attractions, il n'est pas nécessaire de pousser les choses à ces limites. Or un de ces petits tourbillons ne peut dépasser les limites d'un autre que lorsque la distance des molécules est moindre que la somme des rayons de ces tourbillons eux-mêmes. Dès lors, si les distances intermoléculaires ont diminué au point d'être inférieures à cette limite, les sphères d'activité empiéteront les unes sur les autres, et la cohésion pourra résulter de la réunion de plusieurs tourbillons en un seul, ou de l'absorption de plusieurs petits par un plus grand. Poursuivant le développement de notre hypothèse, nous dirons que les molécules étant rapprochées, l'une peut entrer dans le tourbillon d'éther qui environne l'autre, et alors les rotations aidées par l'influence mécanique du milieu tendent à s'effectuer parallèlement aux axes dans une direction déterminée en rapport avec les moments d'inertie des molécules elles-mêmes. Ainsi se produit une enveloppe ou sphère d'activité qui, commune à plusieurs atomes, forme entre eux le lien indispensable pour la constitution des solides et détermine leur mode de cristallisation. Or, d'après un principe de géométrie, il est impossible de remplir complétement avec des sphères égales un volume donné, il existe donc toujours quelques lacunes dans diverses directions, et on s'explique alors l'infinie variété des formes cristallines. Les rotations peuvent également s'accomplir soit autour d'axes fixes, ou variables de position et animés des mouvements dits de précession ; il en résultera une grande diversité des propriétés physiques des solides, telles que densité, ténacité, élasticité, etc.

Tel est le principe général qu'on doit associer à la simple inertie pour expliquer la cohésion des corps. Cela suppose, il est vrai, un milieu dont l'existence n'est pas encore démontrée, mais elle le sera bientôt. Nous avons cru devoir énoncer ces principes dès à présent pour ne pas baser nos théories sur l'incertitude du sens

à appliquer à ces forces. Mais nous pouvons les retenir comme de simples hypothèses jusqu'à ce que leur base soit assurée.

La théorie générale du mouvement moléculaire des corps et des gaz en particulier fut ébauchée par Cauchy[1] vers la fin de 1839 ; se fondant sur la quantité de chaleur absorbée pendant la vaporisation, il annonçait l'existence d'un mouvement de projection dans les gaz dont les molécules, d'après lui, décrivaient des orbites en tournant sur elles-mêmes ; tandis que dans les liquides et les solides le mouvement se réduisait à de simples oscillations. **Historique.**

Plus tard, Clausius affirma hautement l'existence de la force de projection des molécules gazeuses et du mouvement orbitaire ou rotatoire dans les liquides et les solides. L'hypothèse des petits tourbillons moléculaires a été jusqu'ici acceptée avec empressement par les physiciens partisans de l'éther. Rankine, Rodtenbacher, Challis et d'autres ont accepté cette manière de voir, et ils ne croient nullement revenir par cette voie aux tourbillons de Descartes. Ils se sont déclarés partisans de ces idées, et cependant ils ne possédaient pas encore toutes les notions nécessaires pour établir un système complet. Il est bon d'observer que ces tourbillons ne sont pas des simples rotations, mais renferment un autre principe, celui de la collision du milieu environnant, et du changement de densité : nous développerons ces vues théoriques en leur lieu. Pour l'instant, les indications sommaires données plus haut suffisent, et nous répétons encore une fois que si quelques-uns trouvent l'hypothèse des petits tourbillons un peu hasardée, ils peuvent au moins, jusqu'à plus ample informé, conserver l'ancienne théorie des attractions ; dans la suite, nous montrerons quelle est la vraie valeur de cette dernière. De toutes façons, il n'est pas absolument nécessaire d'accepter immédiatement ces hypothèses ; il suffit de regarder comme fait démontré que les atomes ont une très-grande tendance à se réunir ; telle est, du reste, l'opinion de tous les physiciens.

Pour donner une idée des mouvements moléculaires des corps, nous avons placé ci-dessous des figures relatives aux trois états physiques, dans lesquelles on a représenté la route que doit suivre **Figures explicatives des états.**

[1] Voyez *Comptes rendus*, vol. IX.

une molécule dans l'intérieur de la masse par rapport aux autres supposées fixes.

Gazeux.

Dans la figure 7, la ligne polygonale qui serpente indéfiniment dans l'intérieur du corps, représente la trajectoire d'une molécule gazeuse. Cette molécule passe librement d'un groupe à l'autre, heurtant tantôt celui-ci, tantôt celui-là, subissant des réflexions positives ou négatives, changeant de direction à chaque instant, ayant en mot un mouvement comparable à celui que certains astronomes attribuent aux comètes hyperboliques qui passent d'un système stellaire à un autre.



Fig. 7.



Fig. 8.

Liquide.

Les orbites formées de la figure 8 représentent l'oscillation moléculaire dans un corps liquide. Les molécules n'ont point d'axe stable de rotation. L'orbite de chacune d'elles se réduit à la figure formée par les molécules voisines, et il ne se produit aucun mouvement de translation dans ce système en dehors de l'agitation de toute la masse. Ici l'orbite est hexagonale, parce que l'on a supposé les atomes distribués sur un plan, de façon à figurer des triangles équilatéraux, mais elle pourrait être très-différente.



Fig. 6.

Solides.

La figure 9 se rapporte à l'état solide. On doit imaginer les molécules encore plus rapprochées que dans le cas précédent et présentant des axes de rotation diri-

gés parallèlement les uns aux autres, enfin un plus grand nombre de molécules sont comprises dans une même sphère d'activité. Leurs mouvements sont de moindre amplitude que ceux des liquides et sont réduits à de simples oscillations sans aucune translation proprement dite dans une orbite plus ou moins étendue, le transport intérieur dans la masse étant impossible.

Avant d'aller plus loin, nous croyons nécessaire de résoudre une difficulté qui se présentera naturellement à l'esprit : si le calorique est produit par des chocs et des collisions moléculaires, comment se fait-il qu'à la longue ce mouvement ne s'éteigne pas? Les physiciens répondent : De même que le mouvement ne peut prendre naissance sans cause, de même il ne peut se détruire sans cause. En un mot, ils admettent le mouvement indestructible comme la matière; et à leur avis, si les hommes ont été amenés peu à peu à se persuader que la matière ne pouvait s'anéantir, bien que dans certains cas *il serait impossible de prouver le contraire*, de même on arrivera à poser comme axiome que le mouvement lui aussi ne s'anéantit pas. La quantité d'action qui a produit le mouvement dans l'origine, c'est-à-dire la *force première*, reste indestructible dans le système. Le mouvement déterminé par cette puissance initiale se transforme : de translation il devient vibration ou rotation, passe d'un corps à un autre, se subdivise et se communique à un nombre de corps de plus en plus grands, si bien qu'il est impossible de nous représenter d'une façon sensible, comment les choses s'accomplissent aux confins de l'espace, mais assurément le mouvement ne s'annihile pas. En un mot, d'après les physiciens, la production du mouvement aussi bien que celle de la matière ne peut s'expliquer que par une création[1].

Objection.

Réponse.

Nous ne voulons pas assumer sur nous l'entière responsabilité de cette explication; cependant, sans entrer dans la question métaphysique de la possibilité ou de l'impossibilité de la destruction du mouvement, nous dirons qu'au point de vue expérimental on peut toujours reconnaître la conservation de mouvement. Constamment on peut retrouver le mouvement tout entier dans les effets produits, et remonter à ses origines, alors même qu'il semble ou s'anéantir ou se créer subitement... « Une masse de

Cas pratique.

[1] Grove, *Corrélat. des forces physiques*, p. 259, et conclusion finale, p. 265.

charbon en combustion fait naître directement de la chaleur et indirectement de la force mécanique. D'où vient cette force?... Dans le développement du végétal l'acide carbonique est la matière qui fournit le carbone de la plante, et le rayon solaire est l'agent qui sépare les atomes, mettant l'oxygène en liberté, et permettant au carbone de se transformer en fibre ligneuse. Laissez tomber les rayons solaires à la surface du sable, il s'échauffe et finalement rayonne au dehors la chaleur qu'il a reçue; laissez tomber les rayons solaires à la surface d'une forêt, la quantité de chaleur qu'elle rayonnera sera moindre que la quantité absorbée, car l'énergie d'une partie des rayons du soleil est employée à faire croître les arbres. Sans l'intervention du soleil la réduction de l'acide carbonique ne peut avoir lieu, et lorsqu'il a produit son effet, il a dépensé une quantité de lumière équivalente au travail moléculaire accompli. Ainsi sont formés les arbres, et ainsi, lorsque le coton s'enflamme, l'oxygène s'unit à son cher carbone, et cette combustion du coton fait naître une quantité de chaleur égale à celle qui avait été perdue par le soleil pour le développer au sein du végétal[1]. » Tel est, sur ce point, le raisonnement d'un célèbre physicien, et cette doctrine peut s'appliquer à tous les phénomènes de la nature liés entre eux par une merveilleuse solidarité.

Dissipation de l'énergie.

Il est donc évident que pour ce qui regarde l'observation nous trouvons toujours la source d'un mouvement dans un autre antérieur, mais on peut pousser la difficulté encore plus avant. Si le mouvement se conserve, il tend encore à l'égalisation : de sorte que des illustres savants se sont vus forcés par l'évidence des choses à admettre le principe de la *dissipation de l'énergie*. Dans une sphère bornée de corps cette réaction que nous voyons peut bien conserver l'activité, mais en considérant la longue suite des âges, ces centres d'activité que possède chaque système et qui, comme notre soleil, anime la nature dans une étendue déterminée, finiront par se réduire à l'égalité. La dispersion de l'énergie aura produit une quantité égale d'énergie dans toute la création, et par là les échanges actuels qui composent la vie et l'admirable variété de la création disparaîtront. Car la condition de ces

[1] Tyndal, voyez *Cosmos* de Moigno, vol. XXI, p. 275

existences est précisément placée dans ces mêmes différences d'énergie. Ainsi le centre de toute énergie vitale dans notre système, le soleil, perdant continuellement son énergie par radiation, deviendra forcément incapable d'entretenir ses fonctions actuelles. Et quoique cette extinction soit bien éloignée, car on calcule que la température du soleil égale plusieurs millions de degrés, et que la diminution de volume d'une seconde pourrait entretenir sa température pour plus de douze mille ans ; cependant cet état de choses doit arriver. Concluons donc que le principe même de la conservation de mouvement n'empêchera pas la destruction de l'état des choses actuelles.

Distinction importante

Si on considère bien cette objection, elle n'est pas dirigée contre nous, nous n'admettons nullement que l'état actuel doive être conservé, et au contraire nous sommes persuadé que, comme il n'a pas été toujours le même qu'aujourd'hui, ainsi il ne devra pas toujours subsister. Il ne faut pas confondre le principe de conservation de mouvement ou de force ou d'énergie (dans le sens expliqué) avec le principe de conservation de l'état actuel des choses. Le premier n'entraîne pas le second, et seulement l'Auteur de toutes ces choses sait quels ressorts il y aura à mettre en jeu pour conserver l'état actuel, s'il doit être conservé. Ne mêlons pas les questions différentes. Ici il n'est nullement question de la conservation du monde actuel, mais de la conservation générale de l'énergie, qui peut bien se conserver en s'égalisant. Ce qui importe est de se persuader que dans la nature matérielle tout se fait par mouvement et matière, et que dans ce monde matériel n'existent pas certaines forces abstraites comme pourrait le faire croire l'emploi d'expressions parfois purement poétiques et toutes d'imagination.

Principe de Galilée.

Il est bon ici de rapporter une doctrine célèbre de Galilée : « Dans l'univers physique et sensible il n'y a que matière en mouvement ou en repos. La matière ne peut se concevoir sans figure, grandeur, et changement de continuité. En effet, supposons l'existence d'une matière ou substance corporelle, il faut aussitôt imaginer qu'elle est terminée; par suite, qu'elle a telle ou telle figure, et que, par rapport aux autres corps, elle est en mouvement ou reste immobile, » etc.

Le physicien de Pise concluait qu'il n'y avait dans les corps ni odeurs, ni saveurs, ni couleurs, mais seulement certains mouvements ou aspects capable de produire en nous ces sensations. Nous pouvons en dire tout autant de la force; et admettre qu'il réside dans les corps une cause qui nous donne la sensation de l'*effort* à faire pour arrêter un corps en mouvement, ou pour mouvoir celui qui est en repos, et cette cause, nous l'avons déjà vu, n'est autre que la masse elle-même animée de vitesse.

Énergie. Le sens donné aux expressions étant bien expliqué, toute controverse cesse d'elle-même; cependant Rankine a cru bien faire en introduisant dans la science une expression spéciale, afin d'éviter les contradictions de mots. Il propose le terme *énergie* pour désigner la moitié du produit Mv^2, nommé ordinairement force vive, ou encore travail, en la regardant dans ses effets et se fondant sur ce que cette valeur est proportionnelle au travail et en donne la mesure. Car, dit-il[1], le mot force étant employé depuis longtemps pour représenter la tendance de deux corps à changer de mouvement relatif, il est inexact d'admettre qu'on puisse appliquer à cette tendance le principe de la conservation indéfinie, puisque le produit des facteurs indiqués plus haut seul reste constant. Nous convenons que cette précision de langage peut être utile pour éviter des contradictions apparentes, et tranquilliser les personnes délicates, mais tout cela ne revient pas à admettre les forces comme entités, mais seulement comme affections de la matière réductibles au mouvement dont la masse est animée.

Diffusibilité générale. La propriété diffusive et expansive n'est pas propre seulement aux gaz, mais elle se manifeste encore dans les solides et les liquides, surtout à la surface libre, car l'impulsion du mouvement moléculaire n'y étant pas contre-balancée dans tous les sens, les molécules sont facilement projetées hors de la sphère d'action de leurs voisines, dont l'influence ne se fait sentir que d'un seul côté; enfin, ces actions sont encore plus énergiques à la surface des pointes, les molécules étant alors libres dans plusieurs directions.

Des liquides. Le premier fait qui mérite notre attention est celui de l'évaporation des liquides se produisant même à une température notablement inférieure à celle de l'ébullition, c'est-à-dire du point

[1] Rankine B. U., *Arch. sc. nat.*, 1859, vol. V, p. 68.

auquel la tension de leur vapeur surpasse la pression ambiante. Tous les liquides, on le sait, s'évaporent à la température ordinaire, même le mercure le plus fixe d'entre eux; pour ce dernier corps l'expérience des feuilles d'or suspendues dans un flacon à une certaine distance de la surface d'une couche de ce liquide nous le prouve, en outre, les expériences électriques nous apprennent que le vide barométrique n'est qu'un vide imparfait à cause des vapeurs mercurielles. Cette évaporation n'appartient pas exclusivement aux liquides, mais un grand nombre de solides s'évaporent d'une façon très-sensible, exemple la glace, l'iode, le phosphore, et une foule de substances animales. De même, pour beaucoup de corps regardés comme fixes, la diffusion et la sublimation deviennent sensibles, surtout sous l'influence d'un long espace de temps. Tout le monde connaît les empreintes dites de Moser; on les observe à la surface des corps séparés par une très-petite distance, et elles sont attribuées à une lente volatilisation [1]. La diffusion moléculaire s'accroît énormément si l'on élève la température, ou si l'on communique au corps une certaine tension électrique. Zantedeschi a obtenu des empreintes semblables à celles de Moser à l'aide de corps réputés fixes, certains oxydes métalliques, par exemple, en les exposant à de hautes températures dans les fours à porcelaine. L'odeur que possèdent quelques métaux, même à froid prouve leur volatilité. Le nombre des faits de ce genre devient infini si l'on fait intervenir la décharge électrique qui elle-même, comme nous le verrons, est un degré très-élevé des vibrations de la matière. Nous rappellerons seulement que dans un tube de Geissler, les réophores de platine, soumis pendant longtemps à l'action de l'électricité, sont désagrégés, et l'on trouve les parcelles de métal déposées sur les parois du verre. La difficulté d'obtenir un vide parfait dépend surtout de la volatilité des mastics employés pour fermer les jointures. Dans les tubes de Gassiot, le vide s'obtient en remplissant les récipients d'acide carbonique à plusieurs reprises, puis en enlevant la majeure partie du gaz à l'aide de la machine pneumatique, et enfin en absorbant les dernières traces avec de la potasse caustique, puis le tube est fermé à la lampe; or, une légère élévation de température suffit

Des solides.

[1] Bizio, *Dynamique chimique*, t. I.

pour rendre le récipient lumineux et perméable à l'électricité, c'est-à-dire pour produire une diffusion de matière pondérable, de la potasse probablement, qui se manifeste par le passage de l'électricité.

Diffusion dans les liquides.

La pression mécanique de l'atmosphère et des liquides s'oppose puissamment à la diffusion, mais ne l'arrête pas complétement. Graham a récemment étudié la diffusion des sels, des gommes et du sucre dans les liquides, et a reconnu que, pour être lente, la diffusion de ces corps n'en est pas moins très-énergique; et Bizio avait déjà fait observer depuis longtemps que cette diffusion conduit à admettre une tendance des particules d'un solide ou d'un liquide à pénétrer dans les pores d'un autre, à peu près comme cela arrive pour les gaz.

Capillarité.

Lorsque la surface extérieure des liquides est au contact d'un corps solide, on observe certains phénomènes qui n'ont pas leurs équivalents parmi ceux qui se passent à l'intérieur des corps. Telles sont les actions de capillarité; pour expliquer ces faits, il est nécessaire d'admettre une densité différente du liquide dans les couches de la surface, d'où une variation de forme dans la surface libre du liquide.

Lames minces.

La force répulsive ou expansive dont nous nous occupons se manifeste tout particulièrement lorsqu'une mince couche liquide se répand à la surface d'une masse fluide. Si une goutte d'une huile fixe ou mieux volatile (telle que l'essence de térébenthine) est versée à la surface de l'eau pure, elle s'étend immédiatement comme un voile léger et d'une extrême ténuité, présentant les vives couleurs irisées des anneaux newtoniens. Mais une de ces gouttes étant ainsi étendue, la couche formée empêche le développement d'une autre. On réussit la même expérience en employant le sulfure de carbone, quoique son poids spécifique soit plus grand que celui de l'eau. Ce liquide a une telle puissance diffusive qu'il s'évapore même lorsqu'il est recouvert de plusieurs centimètres d'eau; sa vapeur traverse l'eau comme l'hydrogène traverse une forte épaisseur d'acier dans les belles expériences de H. Sainte-Claire Deville.

Couches superficielles.

Un semblable phénomène se produit avec le potassium qui, jeté sur le mercure, semble disparaître; mais, si avec la bouche on

souffle sur le métal, la vapeur d'eau expirée est décomposée, et la potasse formée apparaît sous forme d'un voile très-mince à la surface du mercure. Toutes les substances fourniraient les mêmes résultats si, lors de leur mélange avec d'autres, on pouvait suivre des yeux les premières couches qui se trouvent en présence.

Mouvements.

Une autre classe de faits assez curieux est celle des mouvements présentés par certains liquides lors de leur mélange ou de leur combinaison avec d'autres. Par exemple, on étend une mince couche d'eau sur une lame de cristal épaisse d'environ 2 millimètres; ensuite on laisse tomber sur ce liquide quelques gouttes d'alcool, l'eau est repoussée immédiatement à une assez grande distance du point sur lequel l'alcool est tombé, puis au niveau de la ligne de séparation des deux liquides, c'est-à-dire là où ils se mélangent, se manifeste une grande agitation, jusqu'à ce que l'eau ait repris sa position première.

Les mouvements de l'acide valérianique versé dans l'eau, ceux du potassium et du camphre brûlant à la surface de l'eau[1], etc., sont connus de tous.

Conclusion.

Ces faits, et beaucoup d'autres, dont l'énumération serait superflue, montrent que, au moment de leur réunion, plusieurs substances entrent en mouvement d'une telle façon, que l'on est en droit de supposer leur masse agitée par une force énergique. De pareils mouvements se passent dans l'intérieur de toutes les substances lors d'une combinaison chimique; mais nous ne les voyons pas, tandis que, dans les cas cités plus haut, se développant à la surface libre, ils sont plus prononcés et nous donnent l'image amplifiée de ceux qui appartiennent absolument aux molécules et qui déterminent leur réunion. D'après l'observation fort juste indiquée par Bizio, les actions chimiques doivent toujours être précédées d'une raréfaction, d'un mouvement, d'une expansion de la matière, et on peut voir dans ses ouvrages une nombreuse collection de faits, desquels il tire les conclusions sui-

Diffusion chimique.

[1] Voyez dans Bizio : *Dynamique chimique*, t. I, p. 34 et suiv. Nous ne citons pas les phénomènes de l'eau à l'état sphéroïdal, car ils sont dus non à l'action d'une forte répulsion, mais à un effet de la vapeur interposée entre le liquide et le métal incandescent.

vantes : un certain degré de raréfaction de la matière est une préparation indispensable aux actions chimiques pour tous les corps, et cet état particulier de la matière ne saurait être attribué à l'action chimique, comme on l'a cru jusqu'à présent, car l'effet ne peut préexiter à la cause.

Dans ces conditions, la diffusion est simplement facilitée et d'une manière indirecte par l'action chimique, cette dernière écartant, supprimant les parties dont la présence continue arrêterait la diffusion ou la sublimation des molécules en formant autour d'elles une espèce d'atmosphère qui empêcherait la désagrégation des molécules restantes.

Influence de la forme et de l'électricité.

Les effets de la force diffusive sont d'autant plus marqués que les molécules sont moins fortement soumises à l'influence de leurs voisines ; aussi celles qui se trouvent sur les arêtes ou au sommet des angles solides sont-elles puissamment sollicitées par cette force. On sait combien on facilite la diffusion et l'évaporation des corps en les triturant et en augmentant leur surface ; ces opérations agissent à la façon de la dissolution et de l'action chimique. La même remarque s'applique à la diffusion électrique. Pour expliquer cette force diffusive, il n'est pas besoin de recourir à une action autre que celle à laquelle nous avons attribué la chaleur, et si l'on remarque que l'intensité de ces phénomènes augmente proportionnellement à celle du mouvement calorifique et s'accroît à mesure que les obstacles mécaniques extérieurs deviennent moins nombreux, on sera bientôt convaincu qu'ils sont dus à une même cause plus ou moins active, selon les conditions de rapport et de liberté propres aux molécules.

Influence de la gravité.

Nous parvenons à diminuer considérablement la cohésion des corps, mais ils restent toujours soumis à une force très-puissante, la gravité ; il nous est donc impossible de constater expérimentalement une libre manifestation de la force répulsive. On croit, et non sans raison, que cette force répulsive est en pleine activité dans les comètes, car leur masse étant très-faible, l'attraction exercée par les molécules les unes sur les autres doit avoir une intensité fort peu considérable. Dans nos expériences, nous pouvons supprimer les pressions extérieures supportées par les corps, celle de l'atmosphère, par exemple, mais nous ne possédons aucun

moyen pour détruire ou même diminuer la gravité ; si nous pouvions soustraire les corps à son influence, les phénomènes de répulsion acquerraient une beaucoup plus grande intensité. Or, dans les comètes, ces deux actions font pour ainsi dire complétement défaut ; par conséquent, la force répulsive doit s'y trouver développée à un très-haut degré. Les astronomes reconnaissent maintenant que la gravitation seule ne permet pas de rendre compte des formes présentées par les comètes et qu'il est nécessaire d'admettre l'intervention d'une composante répulsive dépendant de la chaleur même à une grande distance du soleil. Quelques expériences de M. Faye semblent appuyer cette hypothèse : ainsi il a vu l'arc voltaïque jaillissant dans le vide être brusquement repoussé par un corps chaud. En outre, les progrès récents de la spectroscopie démontrent que les comètes ont une lumière propre. Cette lumière suppose une énergie moléculaire analogue à celle des nébuleuses, de laquelle elle se rapproche beaucoup et par le degré de réfrangibilité et par la couleur. Ce pouvoir répulsif paraît avoir une action variable et spéciale dans les différentes comètes, et on ne peut le représenter simplement par un facteur unique de signe contraire à celui qui désigne l'attraction solaire. La pluralité des queues des comètes, la rapidité de leur formation, et surtout le mouvement très-évident des jets lumineux qui, d'abord dirigés vers le soleil, se tournent ensuite à l'opposite, et semblent repoussés par lui, toutes ces particularités montrent un genre d'action spécial, et le seul phénomène analogue que l'on pourrait citer est la répulsion exercée par un corps chaud sur le flux électrique[1].

Force répulsive des comètes.

Pour dilater et diffuser la matière d'une comète, l'action calorifique du soleil peut suffire, mais dans nos laboratoires nous ne pouvons imiter toutes les circonstances qui se trouvent dans l'espace céleste. Non-seulement nous devons supprimer la pression atmosphérique, ce que nous pouvons faire plus ou moins

[1] Voyez les figures de la comète de juillet 1861, dans le *Bulletin du Collége romain*, 1re année, n° 19 : le retrait des jets lumineux est manifeste, et on en suit les progrès d'une nuit à l'autre ; les variations étaient même sensibles à quelques heures d'intervalle. Disons toutefois que le rebroussement des jets pourrait être seulement apparent, ces courbes n'étant que les lignes suivant lesquelles se disposent les molécules libres et sorties de la sphère attractive du noyau.

bien, mais nous devrions supprimer encore la gravité terrestre, ce qui nous est impossible. Il n'est donc pas surprenant que cette force nous reste encore environnée d'un certain mystère.

Atténuation de Newton.

On pourrait encore poursuivre le train des hypothèses, et appliquer à cette force répulsive la magnifique théorie de l'atténuation de la matière, déjà abordée par Newton dans les questions ajoutées à son optique [1], et qui a été reprise dans ces derniers temps par des savants italiens. En considérant le calorique comme un mouvement qui anime la matière, nous expliquerons pourquoi, par l'influence de cette agitation intérieure, les groupes moléculaires, fortement cohérents dans les solides, se séparent les uns des autres et acquièrent la mobilité des liquides. Ces liquides laissent échapper continuellement des vapeurs, même aux plus basses températures; les solides, eux aussi, se vaporisent, car si dans ces corps la force expansive n'est pas suffisante pour surmonter complétement les pressions exercées par les atmosphères ambiantes, cependant leurs molécules se frayent peu à peu une route à travers les interstices de ces milieux. En exagérant le mouvement moléculaire, soit par une élévation de température, soit à l'aide de l'électricité, on réussit à détruire les combinaisons de corps élémentaires, sans même avoir recours à l'action auxiliaire d'un corps étranger pour déterminer la décomposition. Le dernier pas à franchir serait d'obtenir, par l'exaltation de la vibration des atomes constitutifs, la dissociation des groupes formant les molécules des corps dits élémentaires. Alors que deviendrait la matière? Présenterait-elle encore les qualités de la matière pondérable? Newton pensait qu'elle serait transformée en la substance très-subtile qui constitue le feu et la lumière, et nous nous dirons « qu'elle *serait transformée en cette substance que nous nommons éther impondérable* [2]. » Le célèbre chimiste, M. Chevreul, fait remarquer que les quatre éléments des anciens : terre, eau, air et feu, équivalent aux quatre états sous lesquels on

[1] Newton, *Optique*, question 22, p. 319 et 320. Édit. cit.

[2] Après la publication de la première édition de ce livre faite en langue italienne, plusieurs auteurs ont regardé le dernier atome élémentaire isolé comme étant la molécule d'éther, et ont introduit le symbole *m* pour représenter la molécule pondérable, la molécule impondérable étant figurée par un *p*, admettant que les *m* peuvent se résoudre en *p*.

peut concevoir la matière, le solide, le liquide, le gazeux et l'éthéré ; ce dernier étant considéré comme le terme le plus avancé de la désagrégation de la matière par l'action calorifique.

Nous n'anticiperons pas ici sur ce que nous devons dire et développer plus loin, et nous terminerons cette discussion préparatoire sur les forces répulsives par les remarques suivantes : 1° En s'arrêtant au simple témoignage des faits, l'état primitif et naturel de la matière ne semble pas être l'état solide dans lequel il y a cohésion et liaison des molécules, mais au contraire celui dans lequel tous les atomes sont dans une liberté et une indépendance réciproques absolues[1] ; 2° les états dans lesquels les molécules sont liées les unes aux autres appartiennent plutôt à une formation plus avancée, et les forces imaginées pour les expliquer peuvent être regardées comme des effets indirects du mouvement propre à la matière. Conclusion.

Nous exposerons plus loin comment on peut expliquer ce résultat. Pour le moment, continuons à expliquer les phénomènes calorifiques dans l'hypothèse de la chaleur considérée comme force mécanique.

CHAPITRE IX

EXAMEN DU TRAVAIL INTÉRIEUR DES CORPS. DILATATION. — INTENSITÉ DES FORCES MOLÉCULAIRES PAR RAPPORT A LA GRAVITÉ.

Exposition du sujet.

Dans les chapitres précédents nous avons exposé la manière de concevoir les différents états du corps, et nous avons analysé en général les travaux que doit faire la chaleur dans leur intérieur. Il est nécessaire maintenant d'entrer dans le détail de ces phénomènes. Pour plus de clarté nous les réduirons aux catégories suivantes :

1° Élévation de température et travail des dilatations ;

2° Phénomènes dits anciennement de calorique latent, c'est-à-

[1] La substance des nébuleuses est très-certainement gazeuse, car le spectre de ces corps lumineux présente un fort petit nombre de raies et s'il est une matière qui puisse être dite à l'état élémentaire c'est assurément celle-là.

dire de calorique absorbé ou dégagé dans les changements d'état.

3° Variation de capacité des substances provenant de ces changements.

Lorsqu'on soumet à l'action de la chaleur un corps solide, outre l'augmentation de la force vive moléculaire qui constitue la température, il faut encore produire un travail de dilatation. Cette dilatation, pour se faire, exige que les résistances intérieures soient vaincues; par conséquent, outre la chaleur nécessaire pour *élever la température* du corps, il en faut une certaine quantité pour suffire à ce travail intérieur. La dose de chaleur consommée pendant la dilatation est nommée *calorique spécifique*. Ce nombre est donc la somme de deux quantités de chaleur : l'une qui échauffe, l'autre qui travaille. La chaleur continuant à agir, à partir d'un certain degré, la température de la substance chauffée cesse de s'accroître, et le volume d'augmenter; toute la chaleur fournie au solide est employée à le fondre, c'est-à-dire à le transformer en liquide. Continuant encore à fournir de la chaleur, lorsque la masse est fondue, le liquide continue à se dilater jusqu'à un certain degré auquel l'élévation de température cesse, et toute la chaleur fournie est employée à le transformer en vapeur. Nous analyserons les deux opérations dernières dans les chapitres suivants, ici nous exposerons ce qui se rapporte au travail des dilatations.

Chaleurs spécifiques comparées au poids.

Les chaleurs spécifiques nécessaires pour élever les corps à une certaine température, sont communément rapportées aux poids de ces même corps, et par là on obtient des chiffres qui sont bien connus de tous les physiciens. Mais si on compare les chiffres ainsi obtenus on ne trouve aucune relation de cet élément avec les autres propriétés connues des corps. Et cependant il est évident que les liens moléculaires sont bien différents dans leurs différentes classes, de sorte que le travail intérieur devrait être en relation avec ces mêmes autres propriétés dépendantes des actions moléculaires, comme la cohésion, la dureté, la ténacité, etc. Il était présumable que si au lieu de rapporter ces quantités aux poids, on les avait rapportées aux volumes, on aurait peut-être reconnu quelque relation avec les autres propriétés, comme la dureté, ténacité, etc. C'est ce qui est réellement arrivé.

Chaleur spécifique à volumes.

Si nous déterminons les quantités de chaleur absorbées par des *volumes égaux de diverses substances* pour élever leur température d'un nombre déterminé de degrés, c'est-à-dire ce que deviennent les capacités calorifiques, en les rapportant non au poids, mais au volume, nous trouvons la série suivante[1] :

SUBSTANCES.	Calories pour 1°.	SUBSTANCES.	Calories pour 1°.
Potassium.	0,143	Lithium.	0,559
Sodium.	0,283	Molybdène.	0,567
Iode.	0,267	Tungstène.	0,587
Tellure.	0,286	Rhodium.	0,615
Bismuth.	0,305	Or.	0,624
Antimoine.	0,340	Osmium.	0,662
Sélénium.	0,343	Zinc.	0,669
Plomb.	0,357	Palladium.	0,670
Soufre.	0,359	Iridium.	0,678
Étain.	0,415	Platine.	0,685
Magnésium.	0,435	Bore.	0,695
Silicium.	0,428	Cuivre.	0,842
Arsenic.	0,440	Fer.	0,882
Cadmium.	0,487	Cobalt.	0,906
Diamant.	0,519	Manganèse.	0,921
Aluminium.	0,556	Nickel.	0,961

Conclusions.

D'après ce tableau, on voit : 1° que les capacités à volume égal sont représentées par des nombres beaucoup moins différents les uns des autres que ceux calculés par rapport aux poids ; 2° que les capacités les plus faibles appartiennent aux métaux les moins consistants, comme le potassium, le sodium, etc. ; que celles de moyenne grandeur se rencontrent pour ceux d'une moyenne dureté et dont le point de fusion est peu élevé, tels que le plomb et l'étain, etc. ; enfin les nombres les plus élevés correspondent au fer, au nickel et au manganèse. Il est donc évident que la capacité calorifique des corps augmente avec leur ténacité et leur cohésion.

Influence de l'agrégation.

De plus la chaleur spécifique d'une même substance doit varier avec ses divers états d'agrégation. Le charbon offre un exemple remarquable de cette particularité, sa capacité augmentant avec le degré de cohésion.

	Capacité à poids égal.	Capacité à volume égal.
Charbon de bois.	0,242	0,110
Graphite.	0,202	0,144
Diamant.	0,147	0,506

[1] Cantoni, *Su alcune proprietà dei corpi dipendenti dal calore.* Pavia, 1862, et *Nuovo cimento*, 1862, p. 15.

Chaleur spécifique des liquides.

La même loi se vérifie aussi pour les liquides dont les calories de température (chaleur spécifique) varient de 1 à 30, lorsqu'on les détermine à poids égaux, tandis que, pris à volume égal, ils varient de 1 à 3,5[1], mais ils restent toujours inférieurs à ceux des métaux les plus cohérents (l'eau étant exceptée), et les nombres les plus petits appartiennent aux liquides très-volatils, et dont les molécules sont le moins fortement unies.

Objection.

Ainsi disparaît une objection faite à la théorie mécanique de la chaleur. On demandait pourquoi les capacités calorifiques ou calories de température des liquides surpassaient celles des métaux alors que, dans les premiers, la cohésion agit avec moins d'intensité que dans les seconds.

Solution.

La difficulté venait de ce que le point de vue sous lequel on envisageait la question était faux; car il faut tenir compte de l'espace dans lequel les molécules doivent osciller, c'est-à-dire des volumes et non des poids. De plus, les liquides étant généralement des corps composés, la cause de leur grande capacité calorifique peut se trouver dans leur composition particuculière. Nous reviendrons sur ce sujet en temps utile.

Calories de dilatation.

Maintenant pour mettre encore mieux en évidence combien il est nécéssaire dans les corps solides de séparer la quantité de chaleur employée à augmenter la température (force vive moléculaire) de celle qui produit le travail de dilatation, cherchons les quantités de chaleur nécessaires pour produire une même dilatation dans un volume égal de diverses substances, nombres nommés par Cantoni *calories de dilatation*, on trouve la série suivante[2] :

SOLIDES.

Acier	2,659	Antimoine	1,030
Platine	2,585	Aluminium	0,835
Fer	2,185	Zinc	0,784
Cuivre	1,038	Bismuth	0,744
Or	1.448	Étain	0,615
Laiton	1,397	Cadmium	0,519
Argent	1,042	Plomb	0,399

LIQUIDES.

Mercure	0,2508	Brome	0,0334
Acide azotique	0,0861	Chloroforme	0,0320
Acide sulfurique	0,1209	Éther éthylique	0,0258
		Etc.	

[1] Voyez dans Cantoni, p. 18, une liste nombreuse de ces liquides

[2] Voyez Cantoni, *op. cit.*, p. 23.

D'où il résulte : 1° que les calories de dilatation acquièrent leurs plus grandes valeurs lorsqu'il s'agit de métaux et d'autres corps dont la cohérence est maximum. Conclusions.

2° Que, dans les liquides, elles sont notablement moindres que dans les solides.

3° Que, pour les liquides assez fixes, mercure, acide sulfurique, elles sont exprimées par des nombres supérieurs à ceux correspondant aux liquides plus volatils.

Chaleur spécifique comparée avec la cohésion.

Si maintenant nous établissons la relation entre l'élasticité, la densité, la ténacité, etc., et les chaleurs spécifiques, nous trouverons que ces dernières sont proportionnelles aux produits du rapport inverse de la densité par le rapport direct de la cohésion relative, et par suite que les capacités caloriques sont directement proportionnelles à la cohésion des corps[1].

Avec l'élasticité.

Parmi les propriétés moléculaires des corps, une des plus remarquables est l'élasticité ; elle nous montre les molécules susceptibles d'un certain déplacement, de telle sorte que l'on peut évaluer l'élasticité d'après l'allongement par un poids déterminé, pourvu que la position des molécules ne soit pas changée d'une façon permanente, c'est-à-dire que l'accroissement de longueur ne devienne pas définitif. Or l'allongement observé dans ces conditions suppose un travail effectué ; par conséquent, il y a lieu de rechercher si une certaine relation existe entre cette dilatation forcée artificielle et celle que la chaleur produit naturellement. On a constaté que le rapport entre la chaleur spécifique et le coefficient d'élasticité est à peu près constant pour tous les métaux non cristallisés et a pour expression 1,56[2]. Donc, si une quantité donnée de chaleur agit sur un volume égal de ces métaux, elle produira dans les distances moléculaires un accroissement égal à celui que l'on obtiendrait par la traction exercée à l'aide d'un certain poids sur les verges métalliques.

[1] Soient c, c' les chaleurs spécifiques prises à poids égaux des corps dont les densités sont d et d' et la cohésion K et K'. On a trouvé que $\frac{c}{c'} = \frac{d'}{d} \times \frac{K}{K'}$. Donc, $\frac{cd}{c'd'} = \frac{K}{K'}$. Or cD et $c'D'$ sont les capacités calorifiques de l'unité de volume.

(*Note du traducteur.*)

[2] Voyez Cantoni, p. 24, et son *Manuel de physique*, p. 531, dans la note.

La valeur du rapport qui vient d'être cité permet de calculer l'équivalent mécanique de la chaleur ; on trouve, par ce procédé, 424 kilogrammètres. Un tel résultat nous fournit une remarquable confirmation de la théorie, et il suffit pour faire disparaître toutes les incertitudes relatives aux diverses manières de mesurer les coefficients d'élasticité. D'une manière générale, on peut dire que les chaleurs spécifiques, prises à volume égal, sont proportionnelles aux produits des rapports directs des coefficients d'élasticité et de dilatation.

Exceptions expliquées

Dans les métaux soit à structure cristalline, soit écrouis par leur passage à la filière, les coefficients dont nous parlons subissent des variations, mais alors il y une autre cause d'absorption de travail; c'est l'orientation des molécules. Cette circonstance doit exercer une notable influence, la preuve en est que dans les minéraux les chaleurs spécifiques sont différentes suivant la forme cristalline. Ainsi on voit dans un grand nombre de minéraux qui cristallisent, soit en cube, soit en prisme droit à base rhombe, soit en prisme rhomboïdal, les chaleurs spécifiques être directement proportionnelles à leur dureté relative ; et au contraire, pour ceux

Dans les cristaux.

dont la forme typique est le rhomboèdre, elles varient en raison inverse de la dureté. En outre, sur ces derniers, on reconnaît que les chaleurs spécifiques sont d'autant plus élevées, qu'il existe une plus grande différence d'élasticité suivant les axes de cristallisation. En général, les capacités calorifiques des substances cristallisées sont plus grandes que celle des métaux à structure uniforme. Il n'est pas inutile de rapprocher cette propriété de cette autre, que les réactifs chimiques agissent différemment sur les corps, selon qu'ils se présentent cristallisés ou amorphes, et l'on comprend que, dans ces deux cas, la dureté ne soit pas la même[1].

Les faits observés jusqu'ici sur les cristaux sont fort peu nombreux, mais s'ils ne permettent pas d'établir des lois générales et absolues, ils suffisent cependant pour nous guider dans l'étude de nombreux phénomènes. Par exemple, ils sont très-utiles pour expliquer les singularités présentées par l'eau. Ces questions peuvent être traitées sous un point de vue plus juste et plus fécond en

[1] Voyez Cantoni, p. 29.

résultats que celui sous lequel on les a envisagées jusqu'à présent. Il est donc à désirer que les recherches commencées par Cantoni soient poursuivies sur un grand nombre de corps. Le travail de ce physicien renferme encore d'autres résultats fort remarquables, mais nous renvoyons le lecteur au mémoire original, et nous terminerons en rappelant quelques faits relatifs aux liquides et aux gaz.

Particularités dans les liquides.

On a remarqué sur un grand nombre de liquides indécomposables par la chaleur, que les nombres de calories nécessaires pour produire une égale augmentation de volume sont plus élevés lorsque la substance est à l'état solide que si elle est liquide. Ainsi, pour le soufre, on a les nombres 0,225 et 0,082 ; pour l'iode, 0,1086 et 0,496, et pour le phosphore, 0,0901 et 0,0634[1]. Toutes ces valeurs, aussi bien pour les solides que pour les liquides, décroissent à mesure que la température s'accroît : résultat facile à comprendre, puisque au fur et à mesure que diminue la résistance des liens qui unissent naturellement les molécules, on éprouve une moins grande difficulté à séparer celles-ci ; et elles seront d'autant plus faciles à désagréger, qu'elles seront plus éloignées les unes des autres. Aussi, pour l'eau, voit-on la viscosité et les actions capillaires diminuer avec la température, de même que la valeur de la capacité calorifique.

Dans les gaz.

Dans les gaz le travail intérieur, antagoniste de la cohésion, est sensiblement nul, et, par suite, les gaz parfaits, à volume égal et sous une pression constante, ont la même capacité calorifique, tandis que les chaleurs spécifiques, sous des poids égaux, diffèrent énormément les unes des autres.

En second lieu, dans les gaz, soit simples, soit composés, les capacités calorifiques et les chaleurs de dilatation sont plus grandes, à volume égal, pour ceux dont la dilatabilité est la plus prononcée ; elles sont, en outre, en rapport avec la densité relative de ces corps et le très-faible degré de cohésion que peuvent présenter leurs molécules, car dans tous les fluides aériformes les molécules ne jouissent pas d'une égale liberté ; beaucoup d'entre eux qui, à la température ordinaire, se présentent sous la forme gazeuse,

[1] Voyez Cantoni, p. 40.

sont véritablement des vapeurs faciles à liquéfier et même à solidifier par des moyens artificiels.

Les lois de Mariotte et de Gay-Lussac ne se vérifient pas complétement pour ces gaz. Cependant, même dans ce cas, les chaleurs de dilatation, calculées comme on l'a fait pour les solides, c'est-à dire sous des volumes égaux, diffèrent entre elles beaucoup moins que si on les rapporte à des poids égaux, et les valeurs sont d'autant plus élevées que les corps sont plus rapprochés de leur point de liquéfaction. Ainsi l'acide carbonique, l'acide sulfureux et le protoxyde d'azote, donnent 0,0000116, tandis que pour les gaz permanents et l'oxyde de carbone, on trouve 0,0000083. D'après M. Hirn, lorsque la vapeur d'eau est soumise à une pression de 32 atmosphères, l'influence moléculaire intérieure acquiert une valeur que l'on peut estimer à 6 atmosphères $\frac{1}{3}$, quantité nullement négligeable. A vrai dire, il n'y a aucune limite tranchée entre les solides, les liquides et les gaz eux-mêmes, au point de vue des résistances intérieures.

Chaleur spécifique avec la conductibilité.

La conductibilité des corps pour la chaleur est également en relation avec leurs propriétés moléculaires énoncées ci-dessus. En général les corps *ductiles*, mais mous et non élastiques, sont mauvais conducteurs ; exemple les argiles, les cires, etc., et parmi les métaux, les moins bons conducteurs sont les plus malléables et les moins élastiques, tels que potassium, sodium, plomb. La conductibilité calorifique semble donc exiger de la part des molécules deux conditions : d'abord une grande facilité au déplacement (qui produit la ductilité, puis un retour rapide à leur position d'équilibre (qui produit l'élasticité). Une de ces propriétés à l'exclusion de l'autre ne suffit pas pour constituer une matière conductrice. Tel est le cas des corps vitreux, qui jouissent bien d'une très-grande élasticité, mais ne présentent aucune ductilité. Nous verrons ailleurs une nombreuse série de propriétés liées à cet état moléculaire ; pour le moment, notons que les métaux présentant une conductibilité presque parfaite sont les métaux nobles, or, argent platine, cuivre, etc., dans lesquels le déplacement moléculaire peut s'accomplir dans des limites assez étendues et qui jouissent d'une ductibilité et d'une élasticité très-grandes.

Explication.

La raison du fait paraît être celle-ci : plus les molécules d'un

corps sont aptes à faire des excursions ayant une amplitude relativement considérable, et à revenir facilement à leur position d'équilibre, plus facilement aussi elles peuvent heurter violemment les molécules environnantes et communiquer le mouvement qui les anime à une plus grande distance. Or, ces conditions favorisent certainement la propagation du mouvement vibratoire calorifique dans les corps.

Dans les liquides, la chaleur se propage par le moyen de courants causés par des différences de densité, mais on ne peut leur refuser cependant une véritable conductibilité, Magnus l'a démontré ; il en est de même et mieux encore pour les gaz. De tous les fluides, les meilleurs conducteurs sont ceux dont la mobilité est la plus grande, ainsi l'hydrogène parmi les gaz, et le mercure parmi les liquides.

De tout ce qui a été dit jusqu'à présent, tirons cette conclusion : les forces moléculaires, quelle que soit leur origine, diminuent d'intensité à mesure que la distance entre leurs centres d'action augmente ; toutes les circonstances qui accroissent cette distance affaiblissent l'énergie de ces forces, et, par suite, diminuent la quantité de travail à dépenser pour produire un certain effet sur les corps eux-mêmes. Conclusion.

Tout se ramène donc à un principe fondamental : *la quantite de chaleur nécessaire pour produire un effet donné est toujours proportionnelle au travail absorbé par les molécules* : 1° *pour vaincre les résistances qui s'opposent à la manifestation de cet effet*; 2° *pour augmenter l'amplitude des oscillations et des vibrations des molécules elles-mêmes.*

Les considérations précédentes nous apprennent pourquoi les physiciens modernes se sont vus dans la nécessité de distinguer deux capacités calorifiques : l'une (celle admise jusqu'ici) est relative au travail composé dans les corps, on l'appelle capacité ordinaire ; l'autre qui se rapporte seulement à l'échauffement du corps, est dite capacité *absolue*. Ainsi dans l'eau la chaleur spécifique ordinaire est = 1, et nous verrons que la capacité absolue est 0,40. Distinction des capacités. Ordinaire. Absolue.

Donc la théorie mécanique offre un moyen d'expliquer et de coordonner une infinité de faits qui, jusqu'alors, paraissaient fort

éloignés les uns des autres, et ce seul avantage suffirait pour la faire adopter comme une hypothèse physique extrêmement, rationnelle, quand bien même nous n'en aurions pas établi jusqu'à l'évidence les principes fondamentaux comme nous l'avons fait plus haut. Avec ce système disparaît la théorie absurde dans laquelle les diverses formes de la matière sont assimilées à des récipients, véritables cachettes, dans lesquels le calorique se dissimule pendant un temps plus ou moins long ; puis tout à coup s'en échappe et se produit au dehors.

Les faits nous enseignent que si tous les corps n'ont pas la même capacité calorifique, cela résulte simplement de ce que les diverses substances requièrent des quantités de mouvement différentes pour produire un certain travail intérieur dont l'intensité varie suivant la grandeur de l'excursion que doivent faire les molécules et des résistances qu'elles doivent surmonter.

Comparaison des forces moléculaires avec la gravité.

Il ne sera pas hors de propos ici de faire une comparaison entre les forces moléculaires et les autres forces plus connues, par exemple la gravité terrestre. En présence des résultats que nous obtiendrons on ne sera pas surpris de voir que pour vaincre ces résistances moléculaires il faut des quantités de puissance aussi considérables que le sont les forces représentées par les calories de dilatation dont nous venons de parler. La violence des effets produits par ces actions nous porte à croire que ces *infiniment petits* sont des puissances irrésistibles, et que les résistances les plus considérables ne peuvent lutter avec avantage contre ces *géants déguisés*[1].

Exemples.

On sait que la contraction éprouvée par le fer lors de son refroidissement peut être utilisée pour frapper les monnaies, et la dilatation de l'eau au moment de sa congélation fait éclater les canons les plus épais. Suivant M. Hirn, la résistance que l'on éprouve à désagréger l'eau chauffée à 100° équivaut à une pression de 27110 atmosphères ; à 60° elle est de 47448 atmosphères, il s'agit ici d'un liquide ; qu'on juge alors avec quelle épouvantable force se détendraient les molécules aqueuses si subitement les actions de cohésion venaient à cesser ; et cependant on répète

[1] Tyndall, *Mondes*, vol. II, p. 101.

sans cesse que dans les liquides la cohésion est très-faible. La recherche du rapport des forces moléculaires à celles qui nous sont les plus familières, à la pesanteur par exemple, aura l'avantage de nous préparer au problème plus difficile de la corrélation des actions moléculaires et de l'attraction universelle.

Opinion de Laplace.

D'illustres géomètres, et parmi eux Laplace, ont essayé d'expliquer les phénomènes moléculaires au moyen de l'attraction universelle. Il est facile de voir que de cette façon on arrive à des difficultés insolubles.

Recherches de Belli.

Le professeur Belli ayant étudié ce sujet à fond, dans un grand travail, nous extrayons de ce mémoire toutes les conclusions utiles à notre sujet[1]. Ce savant a calculé quelle serait la force k avec laquelle s'attireraient en vertu de la seule gravitation, 2 kilogrammes de matière supposés concentrés chacun en un point mathématique et séparés par une distance de 1 mètre. La valeur de k est la quantité de mouvement qui serait acquise par l'un des corps pendant une seconde sous l'influence d'une force constante égale en intensité à l'attraction de l'autre, le nombre $\frac{k}{g}$ mesure cette force dans un lieu où g est l'intensité de la pesanteur. Faisant $g = 9^m,81859$, on trouve $k = 0,000000\ 000367\ 990\ \frac{1}{\delta'}$ en représentant par δ' la densité terrestre.

L'auteur a calculé ensuite l'attraction entre deux cubes de matière quelconque placés au contact; il a trouvé que la densité de la terre étant supposé 5, l'intensité de cette attraction, pour deux cubes de fer de 1 centimètre de côté, est

$$x = 0^k,000000\ 00000\ 421807,$$

c'est-à-dire un peu plus de 4 billionièmes de kilogramme. Or, la ténacité du fer est T=4470 kilogrammes, donc la valeur de x en fonction à T sera

$$x = \frac{1}{1059\ 570000\ 000000}\ T,$$

c'est-à-dire une fraction insignifiante de la vraie valeur. De même,

[1] Belli, *Mémoire sur l'attraction moléculaire.* Milan, 1855.

entre deux cubes de 1 mètre de côté mis en contact, l'attraction serait à peine de 0,42 de gramme! par conséquent, une valeur infiniment inférieure à la vraie.

Objection. Mais, dira-t-on, dans les calculs précédents, on suppose avec les géomètres la matière continue; si elle était agglomérée en sphères très-petites, d'une très-grande densité et d'un volume fort restreint par rapport à leur distance réciproque, peut-être obtiendrait-on une valeur assez grande pour la force attractive. Belli

Réponse. répond à cette observation en remarquant que l'attraction relative *c* de deux cubes au contact et celle *s* de deux sphères contenant une quantité de matière égale à celle des cubes, sont sensiblement dans la proportion suivante, $\frac{C}{S}=\frac{3}{2}$. Ainsi la différence ne sera jamais très-grande, et de plus la plus grande valeur appartiendra toujours aux cubes.

Supposons actuellement un corps formé d'un très-grand nombre de points placés à une certaine distance les uns des autres, mais d'une densité considérable; nous pourrons substituer à chacun d'eux une sphère ayant une densité finie, car il est reconnu qu'une sphère attire de même que si toute sa masse était réunie en son centre; par conséquent à un milieu composé de points matériels, on pourra substituer un certain nombre de sphères se touchant mutuellement. Cela posé, nous pouvons couper le corps par un grand nombre de plans tels, qu'ils le divisent en une suite de petits cubes, ayant à leur centre un point matériel, puis nous substituerons une sphère à chacun d'eux. La densité de ces sphères devra être (en tenant compte des vides et des parties pleines) la moyenne de celle qui appartiendrait au corps supposé formé par une matière continue; mais ces sphères laissant entre elles des vides, nous les supposerons comblés, par l'addition d'une certaine quantité de matière, de telle sorte que chaque sphère sera remplacée par un petit cube. De cette manière, l'attraction ne sera certainement pas diminuée, elle sera même accrue, puisque nous aurons ajouté de la matière et nous savons de plus que l'attraction exercée à masse égale par un cube surpasse celle produite par une sphère. Or, on a vu plus haut que ces cubes en vertu de la seule gravitation ne peuvent produire une force attractive compa-

rable à la cohésion moléculaire, donc *a fortiori* il en sera de même pour un assemblage de sphères et par suite de points matériels, quelle que soit l'hypothèse admise sur la constitution de la matière.

Conclusion.

Ainsi la théorie de Laplace ne rend pas exactement compte de l'attraction moléculaire, et celle-ci ne peut être attribuée exclusivement à la gravitation.

Il ne faut pas conclure cependant que l'hypothèse de Laplace soit inadmissible; on doit reconnaître seulement qu'elle est impossible en supposant la distribution uniforme des centres d'attraction. Si ces centres se réunissaient de manière à donner à la substance une texture filamenteuse, on pourrait obtenir un effet comparable à la cohésion, en admettant que la densité des filaments fût telle, que la section transversale d'un d'entre eux pût être contenue $10^{32\,000\,000\,000\,000\,000\,000}$ fois dans 1 centimètre carré; à la vérité, une densité aussi démesurément énorme est difficile à admettre. En effet, si la sphère limitée par les étoiles les plus voisines de nous était remplie de platine, et que tout ce métal pût être condensé au point de présenter le volume d'une tête d'épingle, on aurait ainsi à peine une idée de la densité représentée par le nombre cité plus haut.

Principe particulier des forces moléculaires.

Donc les forces moléculaires ou dépendent d'un principe autre que la gravitation universelle, ou bien si le principe est le même, la loi d'action est certainement différente. Du reste, comme nous le verrons plus tard, l'étude des autres forces de la nature conduit à la même conséquence. On peut encore citer le fait suivant comme une preuve palpable de la différence d'origine qui existe entre les deux forces en question. Lorsqu'un corps est rompu, il ne suffit pas, pour ressouder les morceaux, de les affronter exactement, il est nécessaire de lui faire subir une nouvelle fusion. La raison en est simple : en remettant les parties séparées en contact, on ne rétablit pas les distances intermoléculaires dans leurs rapports nécessaires, et les mouvements atomiques dont l'ordonnance a été complétement troublée, et qui s'étaient constitués dans un nouvel état d'équilibre, ne reprennent pas ainsi leur régime primitif. Lors de la rupture d'un corps, il se produit un ébranlement violent dans les tranches solides qui se séparent. On sait en

effet que si une corde de piano vient à se casser, il se dégage fréquemment lumière et chaleur.

Passons maintenant à l'examen des modifications que subissent les corps dans les changements d'état.

CHAPITRE X

DU PASSAGE DE L'ÉTAT SOLIDE A L'ÉTAT LIQUIDE ET *vice versa*.

Analyse du travail.

Dans ce passage les molécules doivent subir des travaux considérables actifs ou passifs. Une certaine quantité d'énergie actuelle passe à l'état d'énergie virtuelle dans cette opération, et par conséquent la virtuelle doit reparaître au rétablissement de l'état primitif. Rappelons ce que nous avons déjà dit ailleurs, que la séparation des molécules du corps les unes des autres peut se comparer à la séparation d'un poids de sa planète. Cette dernière opération exige un travail et une puissance actuelle, qui par ce fait passe à l'état potentiel ; cette puissance doit reparaître tout entière lorsque le poids descend : c'est-à-dire dans notre cas, lorsque le corps reprend l'état primitif.

Entre une substance à l'état solide et la même substance à l'état liquide, d'après la théorie ici exposée, existent les différences suivantes : (*a*) un plus grand rapprochement des parties, (*b*) un mouvement synchrone des diverses molécules constituant un système oscillant comme un atome unique, (*c*) une orientation dans les axes de rotation , (*d*) une adhérence spéciale aux atomes réunis dans un même élément cristallin de la substance.

Densité.

a. On peut poser comme règle générale que les solides ont une densité supérieure à celle des liquides. Il faut excepter seulement les substances très-peu nombreuses qui se dilatent à l'instant de leur solidification, exemple : l'eau, le bismuth, et dans ce cas, selon toute probabilité, les petits espaces intermoléculaires se resserrent pour former des pores plus larges entre les lames cristallines ; pores qui, dans certains cas, sont visibles à l'œil nu.

Orientation.

b. L'orientation moléculaire est rendue évidente par les formes cristallines que revêtent tous les solides obtenus à un état de pureté

suffisante. Certaines substances ne nous apparaissent pas sous forme de cristaux lorsqu'elles sont en grandes masses; elles sont nommées amorphes ou vitreuses; néanmoins elles ont une structure régulière qui les rapproche des cristaux, au moins pour leurs dernières particules. Le verre ordinaire lui-même n'est pas dépourvu de toute structure cristalline, comme on peut le reconnaître avec l'acide fluorhydrique.

c. Le synchronisme vibratoire d'un certain nombre de molécules est une conséquence forcée de la réunion de plusieurs d'entre elles dans une même sphère d'activité pour former la molécule du solide, véritable rudiment du cristal, et cette condition moléculaire nous paraît évidente, d'après l'action des corps solides sur la lumière; en effet, quelques-uns sont incapables de transmettre les ondes d'une certaine longueur, précisément à cause du défaut de synchronisme entre ces mouvements et les vibrations propres aux molécules. L'existence du rhythme vibratoire des particules solides nous semble indiquée en outre: 1° par les phénomènes magnétiques; 2° par les différentes raies colorées du spectre lumineux fourni par les corps lorsqu'ils entrent en combinaison à une température élevée; 3° par les propriétés particulières aux corps isomorphes. **Synchronisme.**

d. Mais le travail principal à accomplir dans la fusion a pour objet la rupture des liens moléculaires, car ils représentent toujours une résistance à vaincre, quelle que soit du reste leur nature, qu'ils aient pour origine certaines forces agissant réellement de molécule à molécule, ou qu'ils résultent au contraire de la pression exercée par un milieu extérieur. **Liens moléculaires.**

Un solide ne pourra donc se liquéfier si ses molécules ne reçoivent pas une quantité de mouvement suffisante pour: 1° éloigner leurs centres; 2° rompre les groupes oscillant d'une façon synchrone; 3° désorienter les axes; 4° surmonter la cohésion. Par conséquent, pendant sa fusion, un solide, afin d'accomplir ces divers travaux, absorbera du calorique, c'est-à-dire exigera l'apport d'une nouvelle quantité de mouvement intérieur, et il ne pourra changer d'état si cette quantité ne lui est pas fournie par des sources étrangères. Ce calorique servira tout entier à donner à un certain nombre de molécules les impulsions nécessaires pour briser leurs **Travail dans la fusion.**

liens, et nullement à accroître les vibrations de la masse restante Aussi la température restera-t-elle stationnaire durant la fusion, Le travail accompli par la force surajoutée sera précisément la destruction des liens moléculaires.

Opération inverse.

Réciproquement, lors de la solidification d'un liquide, il faudra lui enlever toute la quantité de mouvement dont nous venons de parler ; de telle sorte que si par un artifice particulier le corps est maintenu liquide à une température inférieure au point de solidification, comme cela arrive pour les masses d'eau maintenues dans une immobilité absolue, ou encore mises en suspension dans un liquide d'une densité égale à la leur (dans ces conditions, d'après les expériences de Dufour, on peut notablement abaisser la température de l'eau au-dessous de zéro), lors de la congélation, la partie qui se solidifie cède de la chaleur à celle qui reste liquide : en d'autres termes, la vitesse perdue par les molécules de la portion solidifiée se communique aux autres, et le tout remonte à la température normale de la fusion. Cette propriété n'appartient pas exclusivement à l'eau, mais on la retrouve dans quelques autres liquides, dans certains métaux, le plomb et l'étain, par exemple, et même dans les alliages susceptibles de rester liquides au-dessous du point de fusion. Le dégagement de chaleur est parfois très-considérable ; ainsi l'acide vanadique s'enflamme, la zircone fait de même, et l'acide arsénieux produit des étincelles. On observe donc ici un nouvel exemple d'un corps froid cédant de la chaleur à un autre plus chaud, circonstance déjà signalée lors de l'étude des gaz ; ce phénomène n'est nullement contraire aux lois de la physique sur l'équilibre de température, car celles-ci ne comprennent pas les cas où il y a changement d'état des corps. En voyant l'eau rester liquide au-dessous de zéro, à la condition d'être maintenue parfaitement immobile, et se congeler par la plus légère agitation, on en conclut évidemment que les molécules peuvent rester, en vertu de leur inertie, dans un équilibre instable, lequel venant à être rompu en un point, toute la masse reprend son état normal, et, chose remarquable, les vibrations, plus que tout autre genre d'agitation, sont aptes à déterminer cet effet.

Travail de fusion en rapport avec la cohésion.

La fusion exige donc un véritable travail et nous devons nous attendre à trouver la quantité de chaleur nécessaire pour accom-

plir cette opération variable selon la quantité des corps et en rapport avec la cohésion des corps.

En effet, en considérant un changement dans l'état d'agrégation d'un corps comme résultat d'un travail, la quantité de force vive absorbée doit être proportionnelle au travail produit; or, la grandeur de ce dernier variant avec les différents corps suivant leur disposition moléculaire et leur cohésion spéciale, de même les quantités de chaleur nécessaires à la fusion ou à l'évaporation des diverses substances ne doivent pas être égales entre elles. Ainsi la cohésion de la glace étant notablement moindre que celle du fer, la chaleur absorbée doit être moindre pendant la fusion de la première substance que pendant celle de la seconde. De plus, tout corps solide, avant d'entrer en fusion, exige une certaine élévation de température, lequel degré thermométrique dépend évidemment des obstacles plus ou moins grands opposés à l'action de la force qui sépare les molécules.

Or, si on détermine les quantités dont nous avons parlé par rapport à des masses constantes, et en partant du zéro ordinaire correspondant à la glace fondante, on trouve qu'elles ne sont point en rapport avec les propriétés procédant des attractions moléculaires; de sorte que l'on pourrait tirer de là une sérieuse objection contre la théorie exposée précédemment. Mais en examinant les choses de près, on voit facilement qu'il ne faut pas s'étonner si la relation indiquée par la nouvelle théorie ne se vérifie pas; car le défaut de concordance provient des principes qui ont présidé à la détermination des termes du rapport. En effet, nous l'avons dit très-souvent déjà : 1° il n'existe aucun rapport entre le zéro conventionnel de notre thermomètre et les quantités absolues de chaleur contenues dans un corps; au contraire, tout indique que si l'on voulait obtenir des résultats comparables, il faudrait prendre comme point de départ ce zéro absolu fixé par nous à — 273°. 2° Lorsqu'on étudie les phénomènes régis par l'amplitude des oscillations moléculaires, par exemple, la variation de volume d'un corps sous l'influence de la température, il est fort peu rationnel de rapporter les valeurs aux poids et non aux volumes. En effet, dans la théorie mécanique, toutes les questions se réduisent à des calculs de volumes. Par suite, une loi peut ne pas se manifes-

A la température absolue.

Et sous les mêmes volumes.

ter si l'on adopte le zéro ordinaire, et la considération des poids, au contraire, devenir évidente si l'on prend comme bases le zéro absolu et l'observation des volumes. Semblable chose se présente lorsqu'on cherche à établir les lois de la dilatation, on doit déterminer la variation des volumes bien plutôt que celle des poids. Du reste, dans ce cas, l'expérience elle-même a conduit les physiciens à opérer ainsi.

Calories de fusibilité

Suivons donc ces préceptes (*a*) pour calculer les *calories de fusibilité*, c'est-à-dire les quantités de chaleur nécessaires pour porter de — 273° à la température de la fusion un volume égal de toutes les substances. Nous voyons alors les corps les plus tenaces et les plus résistants être précisément ceux qui absorbent le plus de chaleur (*b*). La conclusion est la même si, opérant non pas sur des poids égaux de substances, mais sur des volumes égaux, nous cherchons les *calories de fusion*, c'est-à dire les quantités de chaleur qui, suivant l'ancienne expression, deviennent latentes pendant la fusion (*c*). Et enfin, la même proportion s'observe relativement à la dilatabilité des corps.

et de fusion.

M. Cantoni[1], dans le travail déjà cité, ayant fait ces calculs et ces comparaisons, a dressé la table suivante pour les caloriques de *fusibilité*.

MÉTAUX.	Calories de fusibilité à vol. égaux.	MÉTAUX.	Calories de fusibilité à vol. égaux.
Fer.	1576	Mercure[2].	106
Cobalt	1527	Sodium.	83
Platine.	1428	Potassium.	46
Or.	1211		
Cuivre.	1170	MÉTALLOÏDES.	
Argent.	770	Sélénium.	147
Aluminium.	606	Soufre.	137
Zinc.	469	Phosphore.	105
Cadmium.	295	Iode.	101
Antimoine.	240	Brome.	67
Plomb.	218		
Étain.	212	CORPS COMPOSÉS.	
Bismuth.	164	Glace.	119

Conclusion.

D'après ce tableau, la loi ci-dessus énoncée est évidente, et nous pouvons poser les conclusions suivantes : 1° Le nombre de

[1] Voyez plus haut, l'opuscule déjà cité, p. 47.
[2] Solide à — 40°.

calories nécessaires pour amener une substance au point de fusion est d'autant plus considérable qu'elle est plus tenace et plus dure; 2° A ténacité égale les corps homogènes et de structure cristalline très-peu marquée ont un calorique de fusibilité moins élevé, tels sont le plomb, l'argent, etc.; 3° Les corps appartenant à des classes différentes, les métaux et les métalloïdes par exemple, ne suivent pas les mêmes lois.

Calories de fusion.

Voici maintenant les calories de *fusion* rapportées à des *volumes égaux*[1] :

MÉTAUX.

	Calories de fusion à vol égaux.	Somme des calories de fusion et de fusibilité à vol. égaux.
Argent	208,1	966
Zinc	186,1	664
Bismuth	123,1	285
Étain	114,7	310
Plomb	59,8	273
Mercure	40,9	114

MÉTALLOÏDES.

Iode	55,3	166
Brome	51,7	119
Soufre	18,1	155
Phosphore	8,8	114

CORPS COMPOSÉS.

Nitrate de soude	138,6
Phosphate de soude	97,0
Glace	72,7[2]
Cire d'abeilles	36,5

Conclusion.

Ces exemples peu nombreux (car nous avons limité nos citations) suffisent cependant pour mettre en pleine évidence la relation signalée entre la cohésion d'un corps et la quantité de calorique nécessaire pour détruire cette force et amener le corps à l'état liquide. Nous voyons, en effet, les nombres de calories être proportionnels à la ténacité que présentent les diverses substances à une température peu élevée.

Difficulté du sujet.

Cependant ces rapports ne sont pas aussi simples et aussi saillants qu'on pourrait le désirer; car lors de la rupture d'un solide, il faut tenir compte d'un grand nombre d'éléments qui tous pren-

[1] Cantoni, p. 51, où d'autres exemples sont cités en grand nombre.
[2] On trouve 79,2 en prenant le poids pour unité.

nent part au travail passif de la séparation et de la désagrégation des molécules. Les éléments du problème varient d'une substance à l'autre. Dans certains corps, en effet, il faut faire la part de la dureté, dans d'autres de la ténacité ; pour ceux-ci de l'élasticité, pour ceux-là de la flexibilité. Or un grand nombre de ces propriétés sont jusqu'à présent mal connues, et il serait impossible d'en fixer la véritable mesure et le coefficient. L'influence de la forme cristalline se fait sentir dans presque tous les corps, et à tel point que la même substance absorbe pour fondre une quantité de chaleur différente suivant qu'elle est amorphe ou cristallisée.

Phénomènes de l'eau.

De plus, il faut encore tenir compte de la variation de volume qui se produit subitement pendant la liquéfaction, et constitue un nouveau travail. On peut considérer ces actions moléculaires comme autant de pressions intérieures s'opposant à la séparation des molécules, et il doit arriver, pour elles, ce que l'on observe relativement aux pressions extérieures, lesquelles changent le point de fusion ou de solidification des corps. Ainsi, à l'aide d'une pression suffisante on peut abaisser le point de solidification de l'eau au-dessous de zéro, et on a pu la maintenir liquide jusqu'à — 18° en la comprimant à 1000 atmosphères (Mousson). Or, comme au-dessous de zéro l'eau continue à se dilater, et comme cette dilatation augmente encore lors de sa cristallisation, on comprend pourquoi, renfermée dans un vase assez résistant pour ne point céder à cet effort expansif, l'eau refroidie à une très-basse température reste toujours liquide, ainsi que Rumford l'a expérimenté. Il est bon de savoir que l'abaissement du point de solidification de l'eau par l'influence de la pression a été indiqué *a priori* comme une conséquence de la théorie mécanique de la chaleur[1] ; et cette même théorie nous a appris que la réciproque devait être vraie ; c'est-à-dire que l'on pouvait élever le point de solidification des substances qui se contractent au moment où elles reprennent l'état solide. L'expérience a confirmé cette nouvelle déduction. En effet, le soufre qui, éprouve une contraction lors de sa solidification, fond à 107°, sous une pression d'une atmosphère et à 140° sous une pression de 808 atmosphères.

[1] W. Thomson, *on the Dynamical theory of heat*. Trans. R. Soc. Edinb., 1852, p. 271.

Calories de dissolution.

On peut suivre un second procédé pour transformer un solide en liquide; il consiste à en opérer la dissolution dans un liquide. Dans ces conditions, il se produit également une absorption de chaleur, et il nous faut déterminer toutes les circonstances qui peuvent exercer une certaine influence sur le phénomène. Parmi celles-ci outre la désagrégation du corps solide, on doit compter le travail nécessaire pour disséminer le solide dans le dissolvant, et le changement de volume survenu dans le mélange. L'expérience prouve que l'absorption de chaleur est plus grande lorsque le mélange est fait avec une grande quantité de liquide, et lorsqu'il y a augmentation de volume[1]. Au moment du mélange de certains corps solides, il peut survenir une liquéfaction. Le phénomène est alors assez complexe, car d'une part l'action chimique n'étant pas étrangère au phénomène, la chaleur qu'elle dégage favorise la fusion des solides, et d'un autre le changement d'état détermine un refroidissement. Tel est le cas des mélanges réfrigérants que l'on forme soit avec la glace et le sel, soit avec d'autres substances. Dans les divers cas de la pratique, il sera toujours possible de reconnaître quel est le résultat final produit par la force vive *calorifique* fournie aux substances; mais il sera difficile d'évaluer exactement quelle espèce de travail elle aura accompli.

Complication du phénomène.

CHAPITRE XI

DE LA VAPORISATION DES LIQUIDES ET DE LA LIQUÉFACTION DES VAPEURS.

Analyse du travail.

Ce travail est le plus important dans la pratique, et celui qui éclaire le plus la théorie. On peut lui appliquer à plus forte raison ce que nous avons dit dans le chapitre précédent. Toute vaporisation comprend trois opérations :

(*a*) Il faut chauffer la masse à un degré voulu; (*b*) vaincre la résistance moléculaire intérieure; (*c*) dilater le liquide et en écarter les molécules à un degré nécessaire pour le transformer en vapeur.

[1] Voyez Cantoni, *op. cit.*, p. 58.

D'après notre théorie, le mouvement des molécules du corps présentera trois phases bien distinctes :

(*a*) La vibration moléculaire acquiert une intensité déterminée ; (*b*) les pressions intérieures (dites forces moléculaires) sont vaincues ; (*c*) les molécules sont lancées avec une vitesse telle, qu'elles deviennent plus ou moins indépendantes.

Calorique de vaporisation.

Évidemment ce dernier travail absorbera à lui seul une force vive énorme ; aussi pour gazéifier une masse liquide, il faut une quantité de chaleur supérieure de beaucoup à celle qui en produit la simple dilatation ; cette quantité est nommée *calorique de vaporisation*. Les considérations émises dans les chapitres précédents relativement aux phénomènes qui accompagnent la fusion des solides considérés sous le rapport de l'excursion moléculaire, et la nécessité de calculer leurs éléments numériques en les rapportant aux volumes, peuvent s'appliquer également à la vaporisation. Si, comme cela se pratique habituellement, on évalue par rapport aux poids les calories de vaporisation (le calorique dit latent), on ne trouve aucune relation entre ces quantités et les propriétés physiques des corps, tandis que faisant les calculs sur des volumes égaux, la relation est évidente. Voici des exemples :

	Calorique de vaporisation à volume égal.	Total.	Calorique de vapeur à poids égal
Mercure.	988,7	1145,0	77
Eau.	514,1	610,0	536
Alcool méthylique.	200,5	234,1	261
Acide sulfureux.	138,0	138,0	94
Essence de térebenthine. . .	58,8	124,0	58
Éther acétique.	86,6	119,9	105
Soufre..	111,8	279,7	72
Iode..	88,4	181,7	23

Ce tableau montre clairement comment les liquides les plus denses nécessitent un nombre de calories plus grand.

Le calorique de vaporisation varie suivant le degré de cohésion des liquides et non pas suivant leur viscosité. Nous avons déjà vu que les vapeurs ont généralement une capacité calorifique moindre (environ de moitié) que celle des liquides générateurs[1]. Si les capacités sont rapportées aux volumes, la loi est encore plus évi-

[1] Cantoni, *op. cit.*, p. 75.

Calorique d'élasticité.

dente. Dans ces corps, on doit tenir compte de deux quantités de chaleur : une d'élasticité et l'autre de vaporisation, et cette dernière étant tout entière employée à désagréger les molécules, les liquides, dont les molécules sont fortement unies entre elles, doivent présenter les chaleurs de vaporisation les plus élevées.

En effet, la quantité de travail nécessaire pour séparer les molécules ayant été évaluée en kilogrammètres, on a trouvé pour le mercure 385 kilogrammètres, tandis que pour l'eau, elle est de 318 kilogrammètres, et, pour l'alcool méthylique 78 kilogrammètres. Au contraire, la chaleur sensible produisant simplement la dilatation est exprimée, pour ces mêmes corps, par les nombres 79, 59, 16, et leurs cohésions respectives par 1,92, 1,00, 0,39. Une remarque bonne à signaler, c'est que, dans les divers liquides, le rapport entre les deux genres de travail dont nous avons parlé est sensiblement constant et égal à 11 ; il croît un peu avec la température[2]. Nous avons cité seulement quelques exemples; on pourra en trouver un plus grand nombre dans le remarquable ouvrage de Cantoni.

Grandeur de cette quantité.

D'une manière générale, on peut dire que, pour séparer les molécules d'un corps liquide, il faut une plus grande quantité de chaleur que pour fondre la même substance prise à l'état solide. Donc, eu égard à l'intensité de l'attraction moléculaire, la différence entre un liquide et une vapeur est plus grande que celle qui sépare un liquide d'un solide, fait déjà révélé par d'autres phénomènes. Mais, jusqu'à présent, on n'a pas encore découvert la loi suivant laquelle varient ces quantités de chaleur pour un même corps, et encore moins pour des corps de nature différente. Ainsi, pour désagréger 1 litre d'eau et le convertir en vapeur, il faut presque une quantité de chaleur égale à celle qui pourrait fondre un égal volume de fer.

Changement de chaleur spécifique.

La masse liquide étant réduite à l'état de vapeur, si on lui fournit une nouvelle quantité de chaleur, elle sera tout entière employée à dilater la vapeur produite et à en élever la température, nous supposons, bien entendu, les molécules libres de toute influence moléculaire, comme cela se présente dans les gaz parfaits. Mais évidemment, pour échauffer le corps pris à l'état aéri-

[2] Cantoni, *op. cit.*, p 78.

riforme, il ne faudra pas la même quantité de travail que s'il était liquide; les molécules n'étant plus gênées par leurs voisines, le calorique nécessaire à la dilatation diminuera. Donc, pour élever une masse égale d'une substance donnée, il ne faudra pas le même nombre de calories à l'état liquide et à l'état gazeux. L'expérience prouve que dans le dernier cas il faut environ la moitié du nombre nécessaire dans le premier.

Opération inverse.

Lorsqu'un corps passe de l'état de fluide élastique à celui de liquide, le même cycle d'opérations s'accomplit en sens inverse.

Considérons un gaz très-rapproché de son point de liquéfaction, une vapeur, je suppose; ce corps, abandonnant l'état gazeux, ses molécules doivent perdre leur vitesse de libre translation, afin d'accomplir leur mouvement dans les orbites étroites qui, nous l'avons dit, sont les trajectoires des atomes liquides. Pour se réaliser, un semblable effet exige la soustraction d'une certaine quantité de la force vive de projection renfermée dans la masse, afin que les molécules restent exclusivement animées du mouvement vibratoire. Dans la réalité, cette déperdition se produit peu à peu, et seulement un certain nombre de molécules à la fois abandonnent leur vitesse de projection. De la force devenue ainsi disponible, une partie échauffe les corps environnants, une autre est employée par la portion du gaz encore libre pour résister à la liquéfaction; de sorte que ces deux quantités dynamiques raniment le mouvement vibratoire de la masse ambiante, affaibli par les influences extérieures. Nous avons de cela un exemple frappant dans la liquéfaction de la vapeur aqueuse qui se condense au sein d'un liquide froid, le mouvement perdu par le corps gazeux se communique à un certain poids de liquide et l'échauffe; on a même fondé là-dessus un mode de chauffage utilisé par l'industrie; au contraire, le mouvement peut se répandre lentement dans les corps voisins, dont il élève la température ou tout au moins il en empêche le refroidissement.

Condensation des vapeurs.

De même une certaine quantité de vapeur d'eau répandue dans l'atmosphère vient-elle à se condenser en gouttelettes, elle forme un nuage et dégage de la chaleur; une partie de sa force vive est employée à échauffer l'air sous-jacent, et une autre à maintenir sous forme de gaz la masse de vapeur restante. En un mot, nous avons dans ces circonstances transformation d'un libre mouve-

ment de translation d'une partie du corps en mouvement vibratoire de l'autre.

Changement de capacité.

Les groupes moléculaires de la substance ayant perdu leur vitesse de translation et se trouvant réduits à vibrer suivant des courbes très-resserrées, évidemment, pour obtenir de leur part le même choc sur les molécules voisines, il faudra leur communiquer une force vive supérieure à celle qui auparavant était suffisante, car la même force vive ne produira plus une vibration d'une aussi grande intensité, et, de plus, la dépense de force variera dans des limites assez étendues, car la distance parcourue par les molécules et le nombre des chocs qu'elles exercent contre leurs voisines changent avec la nature et l'état des corps. Il y aura donc nécessairement des différences dans les effets produits par une même quantité de mouvement extérieur communiquée à une masse de matière selon l'état physique sous lequel elle se présentera, et de là changement de chaleur spécifique du même corps à l'état liquide et gazeux.

La quantité de mouvement qui, dans un gaz, produit un certain déplacement linéaire des molécules, et, par suite, un redoublement d'intensité dans leurs chocs réciproques, ne produirait pas le même effet si le corps était liquide, car les molécules, dans ce dernier, étant cernées par leurs voisines, les collisions sont plus fréquentes; par suite, il faudra des quantités différentes de force vive dans les deux cas pour obtenir dans une substance donnée un même accroissement des vibrations thermiques, c'est-à-dire de la température; autrement dit, *la capacité calorifique d'un corps change avec l'état du corps*. Cette déduction est justifiée par l'expérience, car on a reconnu que dans tous les corps liquides les chaleurs de température sont plus grandes qu'elles ne le sont pour les mêmes corps à l'état gazeux. La capacité calorifique de l'eau à l'état liquide est 1; à l'état de vapeur, elle est égale à 0,475, et il en est de même des autres corps[1]; de sorte que, à très-peu près, la capacité des fluides réduits à l'état gazeux serait généralement la moitié de celle qu'ils présentent à l'état liquide. Ce résultat doit être accepté sans tenir compte des actions secondaires possibles, telles que les variations des mouvements de vibration, l'influence

[1] Voyez Cantoni, p. 73.

des milieux environnants, les forces moléculaires, toutes conditions qui influent sur la capacité calorifique comme nous avons vu, mais dont nous pouvons pour le moment faire abstraction.

Développement ultérieur.

On comprendra encore mieux les considérations précédentes en examinant le cas inverse, c'est-à-dire le passage d'un liquide à l'état de gaz; alors il faut développer dans les molécules une vitesse de projection assez énergique pour leur permettre d'abandonner la sphère d'activité des molécules voisines, et la quantité de mouvement à fournir dans ce cas doit être suffisante pour : (*a*) séparer les molécules de celles qui les environnent et leur frayer une route au travers de celles-ci, (*b*) pour maintenir ces mêmes molécules en mouvement.

Deux cas différents.

Ce changement d'état peut se faire dans deux conditions différentes : dans le premier cas le corps ne reçoit de l'extérieur aucune nouvelle quantité de calorique; dans le second il en reçoit.

1° Le corps reçoit de la chaleur.

1° Premier cas : pendant l'évaporation d'une partie du liquide, celle-ci devra recevoir de la portion restante, ou des corps environnants la quantité de mouvement afférente à son nouvel état; par conséquent, elle absorbera de la chaleur à tous les corps voisins, la masse liquide non vaporisée y comprise. Tel est le cas ordinaire de l'évaporation des liquides à la température ordinaire, aussi elle s'accompagne toujours d'un abaissement de température, et même sur ce principe on a fondé la construction du psychromètre des météorologistes. Les phénomènes sont beaucoup plus marqués avec les liquides très-volatils, tels que ceux résultant de la condensation de corps ordinairement gazeux, mais susceptibles de se liquéfier sous l'influence combinée d'une forte pression et d'un abaissement considérable de température (ex. : acide sulfureux, acide carbonique, protoxyde d'azote, etc.) ; alors si la pression diminue, ils reprennent l'état aériforme et absorbent une quantité de chaleur telle, que les physiciens emploient ces liquides pour obtenir de très-grands froids; avec l'acide carbonique liquéfié, la température descend à — 70° et même à — 100°. La soustraction du calorique se fait avec une telle rapidité que l'on peut congeler l'eau dans un creuset de platine incandescent, au moyen de l'acide sulfureux liquide, et elle est assez intense pour que, lors de l'évaporation de l'acide carbonique liquéfié, une partie

du liquide se solidifie (Thilorier). Les phénomènes s'expliquent facilement, car par hypothèse la force vive restant constante dans la masse encore liquide et dans celle en voie de gazéification, comme les molécules de cette dernière doivent acquérir une vitesse extrême (le volume devenant au moins 400 fois plus grand), il faut bien que l'autre partie subisse une perte correspondante, rien d'étonnant alors à ce qu'elle se solidifie. L'énorme pression exercée par la quantité de liquide, reprenant l'état gazeux sur celle qui demeure dans son état primitif, peut aussi favoriser la solidification de celle-ci; en effet, cette pression, malgré sa très-courte durée, doit, par un véritable effet mécanique, produire un rapprochement des molécules du liquide restant. Explication.

2° Dans le second cas, si on augmente la quantité de chaleur renfermée dans une masse liquide, lorsqu'elle a atteint le point d'ébulition, c'est-à-dire la température à laquelle la tension de la vapeur égale celle de l'atmosphère ambiante, l'addition d'une nouvelle quantité de chaleur ne déterminera pas un accroissement de température, le supplément de force fourni aux molécules sera employé ni à augmenter leur collision réciproque, ni à dilater la masse liquide, mais à communiquer un mouvement de projection et une vitesse suffisante aux atomes de la masse liquide qui se transforme en gaz ou en vapeur[1]. Dire que le liquide se vaporise, c'est admettre implicitement qu'il existe un espace dans lequel les molécules peuvent se dégager. Si cet espace manquait, la température s'élèverait indéfiniment le corps conservant toujours l'état liquide. 2° Le corps reçoit de la chaleur.

Lors du changement d'état dont nous nous occupons, on observe un fait fort remarquable qui, à première vue, semble paradoxal et contraire à la théorie de la chaleur établie par Clausius et Thomson. Voici ce fait : un corps froid peut céder de la chaleur à un autre plus chaud que lui. En effet, la portion qui se vaporise possède dans le principe une certaine quantité de force vive qui à l'instant de la volatilisation s'accroît considérablement aux dépens de la masse restée liquide et alors celle-ci plus froide que la pre- Cas particulier.

[1] Nous disons gaz ou vapeur, car il n'y a aucune différence réelle entre ces deux états, si ce n'est que les vapeurs sont des gaz dont le point de liquéfaction est peu élevé, et inversement pour les gaz.

mière lui abandonne cependant une certaine quantité de chaleur. De même la température d'un corps froid peut s'élever par l'action d'une substance encore plus froide. Nous citerons un exemple : Une masse d'eau étant refroidie à — 5°, je suppose, si on la touche avec un corps à — 2°, elle se congèle en partie et toute la masse remonte à 0°. Ainsi un corps froid, lors de son changement d'état, peut céder de la chaleur à un autre plus chaud que lui. En présence de ce fait, on nous adressera peut-être l'objection suivante : Si la température dépend de la vitesse propre aux molécules, comment se peut-il qu'une molécule douée d'une moindre vitesse en communique une plus grande à une autre? — La réponse est simple lorsqu'on suppose les molécules animées d'un double mouvement de rotation et de translation, car les vitesses de rotation peuvent, nous le savons, se transformer en vitesses de translation, et, à la suite d'un choc, un mobile peut rebondir avec une vitesse supérieure à celle qu'il avait auparavant.

Explication.

Objection à la théorie ordinaire.

Dans l'hypothèse de molécules simplement élastiques, on a essayé d'expliquer le phénomène dont il vient d'être question; mais alors, comme la molécule exerçant le choc communique à celle qui l'éprouve une vitesse supérieure à la sienne, on suppose à la première une masse plus grande que celle de la seconde, et cette hypothèse n'est pas toujours admissible. Donc on est loin de pouvoir tout expliquer en supposant, comme on le fait ordinairement, les molécules douées seulement d'élasticité, tandis que la théorie adoptée par nous est beaucoup plus générale. Les molécules, spécialement celles des liquides et des solides, possèdent certainement une énorme vitesse de rotation; et la force vive, ou le travail, est *emmagasiné* dans ces molécules. A l'occasion d'un choc convenable, cette force vive pourra se transformer en mouvement de translation et restituer le travail, jusque-là tenu en réserve; en un mot nous dirons de la rotation moléculaire ce que l'on a dit de l'inertie : son action est comparable à celle d'un volant, elle sert à emmagasiner la force ou le mouvement (voyez plus haut, page 13).

Influence des espaces libres.

Non-seulement la pression extérieure, mais encore diverses influences étrangères font varier le point d'ébullition d'un liquide; parmi les plus importantes on peut citer le contact des corps solides; en effet, sur les surfaces mises en rapport avec les liquides

se rencontrent toujours quelques bulles d'air adhérentes représentant de petits intervalles libres, qui favorisent le dégagement des molécules ; de plus, ces surfaces par leurs rugosités plus ou moins prononcées agissent comme une force répulsive d'intensité variable. Aussi a-t-on reconnu que de petites masses d'eau, mises en suspension dans un liquide de même densité, pouvaient être portées à une haute température sans se volatiliser ; mais, si on rompt cet état d'équilibre forcé par un moyen quelconque, le contact d'un fil métallique, je suppose, elles produisent une vigoureuse explosion, et leur température s'abaisse aussitôt. (Dufour.)

Donc, en augmentant la quantité de chaleur d'un liquide, on ne le vaporise pas si la diffusion de ses molécules est empêchée, et au contraire la température ne s'élève pas si la vapeur peut se former librement.

En résumé, dans tous les gaz on doit considérer deux quantités de chaleur, une, qui détermine son degré de tension, peut être nommée calorique *d'élasticité ;* l'autre est celle qui a été nécessaire pour séparer les molécules liquides, c'est le calorique de *vaporisation*.

En employant la vapeur comme puissance mécanique, évidemment on utilise seulement la première quantité, c'est-à-dire environ $\frac{1}{12}$ de la chaleur totale ; la seconde constitue une perte réelle, puisque pour obtenir un travail, il faut condenser la vapeur et alors la chaleur de vaporisation redevient libre tout entière. Pour éviter cet inconvénient, on a imaginé les machines à air chaud, dans lesquelles on fait intervenir exclusivement la chaleur de dilatation, mais les praticiens ont reconnu que ces machines étaient inférieures aux autres sous plusieurs rapports comme nous l'avons déjà vu.

Forces moléculaires dans les gaz.

On se demandera si les forces moléculaires attractives sont exactement détruites dans les gaz. Dans ce cas, les lois de Mariotte et de Gay-Lussac doivent être rigoureusement exactes, et, dans le calcul de la tension finale d'une masse gazeuse, on pourra négliger le travail interne. Or les délicates investigations de M. Regnault et d'autres physiciens ont mis en évidence les écarts de ces deux lois. Il a été reconnu que les coefficients de dilatation

varient avec les températures ; mais que, pratiquement parlant, on peut les regarder comme constants pour l'hydrogène, l'azote et l'oxygène, gaz considérés comme parfaits, au moins dans les limites de nos procédés d'observation. Par suite, l'expérience des deux ballons communiquants, faite par Joule, fournit des résultats conformes à la théorie seulement avec les gaz parfaits ; car, en employant l'acide carbonique ou d'autres gaz non permanents, on constate réellement une différence finale de température dans le système, comme cela doit arriver toutes les fois qu'une réaction intérieure prend naissance.

Les gaz nommés permanents ne sont que de simples vapeurs très-éloignées de leur point de saturation, ou encore des vapeurs surchauffées. Pour ces gaz, dans le cas où ils sont parfaits, la capacité calorifique entendue comme on le fait ordinairement équivaut à la capacité *réelle* ou *absolue*, car le travail intérieur est nul dans un de ces gaz chauffé sous une pression constante.

Volume des corps au zéro absolu de température.

Considérant la dilatation des gaz permanents comme la mesure de la force vive dont sont animées leurs molécules, on peut dire que si leur force expansive devient nulle, il en sera de même du mouvement moléculaire, et alors on aura le zéro thermométrique absolu que nous avons déjà trouvé et fixé à — 273°. On peut se demander quel sera le volume d'un corps à cette limite? Si la loi des gaz se vérifiait jusqu'au bout le volume d'un corps devrait se réduire à zéro par l'effet d'une soustraction continue du calorique, c'est-à-dire que la matière d'un corps pourrait disparaître complétement, ce qui est absurde. Mais avant de cette limite, le corps passera certainement par l'état solide et alors la loi doit changer. Posons $\alpha =$ le coefficient de dilatation d'un corps pour un degré centigrade, le volume du corps sera toujours exprimé par

$$V_1 = V_0 \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_0},$$

t et t_0 étant les températures en degrés centigrades. Si t_0 représente le zéro de notre thermomètre et si on donne à α sa valeur maximum, c'est-à-dire le coefficient de la substance la plus dilatable, soit

$$\alpha = 0{,}00015 = \frac{1}{6666}$$

en suposant t_1 = le degré du zéro absolu, $t = -273°$, la formule devient

$$V_1 = V_0\left(1 - \frac{273}{6666}\right) = 0,959\,V_0.$$

Autrement dit, les corps, à la température de zéro absolu, occuperont un espace inférieur à 0,04 environ à celui qu'ils présentent à la température de la glace fondante. Cette conclusion, relevée par M. Hirn, est notablement différente de celle qui était reçue autrefois, lorsqu'on admettait que l'espace vide dans les corps était plus grand que le plein. Mais, rappelons-nous qu'il reste une grande incertitude sur la façon dont se comportent les corps dans le voisinage du zéro absolu.

Rapports des travaux intérieurs dans les corps.

Après les discussions et les recherches précédentes nous sommes en état de déterminer la valeur relative des travaux intérieurs des corps et des travaux extérieurs. Nous avons distingué les effets différents et la capacité *absolue* de la capacité *vulgaire*, résumons brièvement ce vaste sujet et exposons les résultats définitifs.

La chaleur : 1° augmente la température, 2° surmonte les résistances intérieures et 3° les résistances extérieures. (*a*) Le premier travail produit la température, et posant K = la quantité de chaleur requise par le corps pour s'échauffer de 1°, on a K = *la capacité calorifique absolue* de la substance. Cette quantité doit conserver la même valeur à toutes les températures, car elle dépend seulement de l'inertie de l'atome, c'est-à-dire de sa masse à laquelle on doit communiquer une certaine vitesse. Donc, la quantité de chaleur absorbée par le corps pour s'élever d'un certain nombre de degrés sera $K\,(t_1 - t_0)$. (*b*) Le travail employé à vaincre les résistances intérieures est assez difficile à préciser, il est fonction composée de la cohésion et des autres propriétés physiques du corps; nous nous sommes entendus sur ce point dans un chapitre précédent et nous avons représenté ce travail par AA. (*c*) Enfin le travail extérieur est exprimé par $AP\,(V_1 - V_0)$.

Ces trois quantités de travail sont confondues en une seule dans la quantité désignée ordinairement par les physiciens sous le nom de *chaleur spécifique*, et si *c* représente ce nombre, on a :

$$c = K(t_1 - t_0) + AA + AP\,(V_1 - V_0).$$

Il nous est généralement impossible d'isoler dans nos expériences les diverses parties de cette somme; cependant certaines classes de substances se prêtent plus ou moins facilement à la détermination de quelques-unes de ces quantités.

Constance du produit PK dans le gaz.

Les gaz, par exemple, peuvent s'échauffer sous un volume constant, et alors le dernier terme de la somme c devient nul; de même pour les solides, on peut négliger cette même quantité par rapport aux autres. La dilatation sensiblement uniforme de tous les gaz nous apprend que le travail intérieur dans ces substances est extrêmement faible, et si nous le regardons comme nul dans les gaz parfaits, nous seront autorisés à croire que, dans les gaz qui pour nous se rapprochent le plus de l'état théorique (hydrogène, oxygène, azote), le produit de sa masse ou poids atomique P pour l'augmentation de leur force vive qui est, dans le cas, représentée par la capacité K, devra être constant. Cela est-il admissible ou non, nous allons l'examiner.

L'équation précédente donne, en y supprimant la quantité AΛ :

$$K = \frac{c}{t_1 - t_0} - \frac{Ap(V_1 - V_0)}{t_1 - t_0}.$$

Si nous remplaçons dans cette expression les lettres par leurs valeurs, et désignant par α le coefficient de dilatation du gaz pour 1° de température et par δ le poids de 1 mètre cube de gaz, on aura :

$$K = c - \frac{\alpha}{\delta}\left(\frac{10333}{425}\right).$$

Ce nombre, multiplié par P, devra donner un produit constant si la théorie que nous développons est exacte.

M. Hirn a fait le calcul, et il a trouvé pour :

Oxygène.	PK = 15,510
Hydrogène..	= 15,096
Azote.	= 15,069

Les autres gaz fournissent un résultat qui s'approche d'autant plus des chiffres précédents, que les substances sont elles-mêmes plus voisines de l'état gazeux parfait. En prenant l'atome de l'hydrogène pour unité et en divisant par 2 celui de l'oxygène, on obtiendrait 3,875. On voit donc que le produit P × K est sensiblement constant toutes les fois que le travail intérieur n'existe pas.

Dès lors on pourra se servir de ce résultat pour opérer sur un corps quelconque et calculer, par exemple, A, c'est-à-dire le travail intérieur. Cette détermination est facile dans le cas des solides, car on peut alors négliger la quantité toujours très-petite $Ap (V_1 - V_0)$. Validation du travail intérieur.

Ces calculs ont été faits par M. Hirn. et voici un tableau tiré de son ouvrage[1] :

Substances.	AA = Travail intérieur exprimé en quantité de chaleur.	Capacité calorifique vulgaire.
Fer.	0,0696	0,1137
Nickel.	0,0681	0,1186
Cobalt.	0,0663	0,1069
Zinc.	0;0583	0,0955
Cuivre.	0,0573	0,0951
Sélénium.	0,0534	0,0837
Arsenic.	0,0295	0.0814
Palladium.	0,0367	0,0592
Étain.	0,0358	0,0562
Cadmium.	0,0352	0,0567
Argent.	0,0348	0,0571
Antimoine.	0,0322	0,0511
Or.	0,0202	0,0325
Platine.	0,0202	0,0324
Plomb.	0,0196	0,0314
Bismuth.	0,0198	0,0308
Eau.	0,6000	1,0000
Nitrate de potasse. . .	0,1204	0,2587

On voit par là que d'une manière générale, dans tous les corps simples solides, les deux tiers environ de la chaleur communiquée à leur masse est employée à accomplir un travail intérieur, et le tiers restant à échauffer la substance. Pour l'eau, la chaleur absorbée par le travail intérieur est 0,6 de la quantité totale! Bien que l'eau soit un corps composé, elle ne fait pas exception à la règle établie pour les corps simples, règle sur laquelle nous reviendrons après avoir étudié un cas encore plus remarquable de l'action de la chaleur sur les corps.

[1] Hirn, *Théorie mécanique de la chaleur*, première partie, p. 314.

CHAPITRE XII

DE LA DÉCOMPOSITION CHIMIQUE OU DISSOCIATION PRODUITE PAR LA CHALEUR ET DE LA QUANTITÉ ABSOLUE DE LA CHALEUR DANS LES GAZ.

Analogie de la dissociation avec les changements d'états.

Il nous reste à parler finalement d'un troisième cas analogue aux deux précédents ; celui dans lequel le mouvement thermique augmentant d'intensité, non-seulement les groupes *physiques* dont les solides sont constitués, mais encore ceux d'ordre *chimique* qui forment les corps composés se détruisent peu à peu. Phénomène intéressant, car il nous fait voir que l'attraction physique et l'attraction chimique, comme on les appelle ordinairement, ne sont réellement pas de nature différente.

La chaleur est un des moyens d'analyse les plus puissants que possède la chimie, une infinité de corps composés ne résistent pas à son action ; si la température est peu élevée, les sels perdent leur eau d'hydratation ; s'accroît-elle davantage, les oxydes et les carbonates sont réduits par la calcination, et ainsi de suite. *Corpora non agunt nisi soluta*, était un adage accepté par les anciens chimistes, et plusieurs d'entre eux regardaient la chaleur comme le dissolvant universel ; pour les modernes, elle agit en mettant les molécules dans un état élastique, qui leur laisse une liberté favorable à l'exercice de leurs affinités mutuelles[1].

Conditions de séparation des éléments.

Ordinairement les corps les plus stables se décomposent en présence d'un autre ayant une grande affinité pour l'un de leurs éléments ; mais par l'emploi de procédés assez simples, on peut décomposer un certain nombre de ces corps sans l'intervention d'aucun autre. L'eau, par exemple, peut être décomposée à une température assez inférieure à celle de sa formation. Il est remarquable que dans ces circonstances une certaine quantité de chaleur disparaît et devient latente, de même que cela se présente dans la vaporisation. Si l'on veut réaliser cette analyse, il faut s'arranger de manière à ce que les deux éléments de l'eau, une fois désunis, soient rapidement séparés l'un de l'autre alors qu'ils possèdent

[1] Voyez ce qui a été dit plus haut, p. 68.

encore une haute température, sinon ils se recombinent au sortir de l'espace dans lequel ils viennent d'être isolés. La vapeur d'eau ne se décompose pas en traversant un tube de platine chauffé à un degré voisin de sa fusion; mais elle ne résiste pas à une température beaucoup moindre lorsqu'elle rencontre sur son trajet une substance capable de fixer un de ses éléments, et de le séparer de l'autre; ainsi agissent l'oxyde de plomb et certains corps absorbant l'oxygène, etc. Ces substances ne doivent pas nécessairement exercer une action dite d'affinité; quelques-unes, en vertu d'un simple effet endosmotique, opèrent mécaniquement une véritable filtration. Ainsi l'eau se décompose à une température relativement peu élevée si l'on fait usage d'un tube poreux, lequel permet à l'hydrogène de se séparer de l'oxygène, en vertu de sa force expansive.

Cette belle expérience a été récemment faite par M. H. Sainte-Claire Deville (fig. 10). Soit un tube de terre poreuse *ab* enfermé

Expérience de H. Ste-C. Deville.

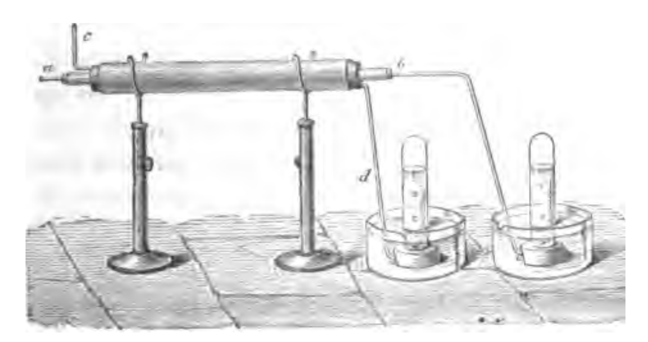


Fig. 10.

dans un autre plus large en porcelaine vernissée, tous deux munis de bouchons et de tuyaux disposés de façon à laisser entrer et sortir les gaz. Si à la température ordinaire on introduit de l'hydrogène dans le tube poreux et de l'acide carbonique dans l'espace annulaire, en examinant les gaz à leur sortie de l'appareil, on recueillera l'acide carbonique à l'extrémité du tube intérieur *a b*, et l'hydrogène se dégagera de l'espace annulaire *c d*. Les gaz ont donc traversé la paroi poreuse chacun en sens opposé par un

de ces effets d'endosmose et de diffusion dont nous avons parlé plus haut.

Supposons maintenant notre double tube porté à une haute température, à 1000° ou 1300°, par exemple; on fait passer un courant de vapeur d'eau dans le tube central et un courant d'acide carbonique dans l'enceinte annulaire ; alors il se dégage du tube extérieur un mélange détonant et du tube intérieur un mélange d'oxygène, d'oxyde de carbone et de vapeur d'eau. Voici comment les choses se sont passées : l'eau a été décomposée, son hydrogène a traversé la paroi poreuse de même que dans l'expérience à froid. Se trouvant alors en présence de l'acide carbonique, il l'a décomposé en oxygène et oxyde de carbone. Cet oxyde de carbone filtre dans le tube intérieur et en sort mêlé à l'oxygène provenant de l'eau décomposée.

Si, au lieu de recourir à la disposition précédente, on avait fait passer un courant de vapeur d'eau dans un tube en platine chauffé à une température voisine de sa fusion, l'eau, avons-nous dit, serait sortie indécomposée. En effet, ses éléments se seraient séparés dans la partie la plus chaude et recombinés dans la région plus froide. Grâce à cet appareil, on a pu isoler les gaz en les soustrayant à leur action réciproque. Dans l'expérience indiquée, la décomposition de l'eau s'opère à une température notablement moindre que celle de sa combinaison ; le phénomène est comparable à l'évaporation : cette dernière se produit en effet à une température inférieure au point d'ébullition, et elle est favorisée par la présence d'une substance hygrométrique, absorbant la vapeur au fur et à mesure de sa formation.

Évaluation de la chaleur latente.

Le fait qui nous intéresse le plus dans ces recherches est celui de l'absorption d'une certaine quantité de chaleur qui devient latente pendant la *dissociation* de la vapeur d'eau, pour employer l'expression de Deville ; voici la valeur de la quantité de chaleur absorbée[1].

Calories de décomposition.

MM. Debray et Deville ont conclu de leurs expériences que l'élévation de température produite par l'hydrogène brûlant dans l'oxygène ne dépasse pas 2500° [2]. A ce degré de chaleur, les gaz

[1] Voyez *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 2 février 1863, t. LVI, p. 199.

[2] Les déterminations nouvelles de MM. Bengen et Deville donneraient un chiffre un

occupent un volume plus que décuple de celui qu'ils présentent à 0°, la vapeur d'eau ne peut donc résister sans se décomposer à une température capable de rendre son volume dix fois plus grand. Tout en admettant donc que dans des circonstances particulières l'eau puisse être décomposée à des températures plus basses, il est certain que le maximum de la température à laquelle elle ne peut plus subsister est de 2500° environ. Or la quantité de chaleur nécessaire pour élever ces gaz à 2500° (en supposant leur capacité calorifique constante) est égale à

$$637 + (2500 - 100)\,0{,}475 = 1680 \text{ calories}$$

(le gramme étant pris comme unité). Dans cette expression 637 est la température absorbée par 1 gramme d'eau pour passer à l'état de vapeur et s'élever de 0 à 100°; secondement le terme (2500 — 100) 0,475 représente le nombre de calories nécessaires pour élever ce gramme de 100 à 2500°. Telle est la quantité de chaleur maximum que peuvent renfermer les gaz au moment de leur décomposition.

Voyons maintenant la quantité de chaleur dégagée pendant la combinaison. D'après les expériences de Fabre et Silbermann, la chaleur produite lors de la formation de 1 gramme d'eau est 3833 calories. Mais la chaleur dégagée pendant la combinaison des gaz en quantités convenables pour donner naissance à 1 gramme d'eau, doit être précisément égale à celle qui doit être communiquée à ce gramme lorsque, étant décomposé, ses éléments reprennent l'état gazeux, c'est-à-dire 3833 calories. Ce nombre est bien supérieur aux 1680 calories de la décomposition, et si une telle quantité était réellement appliquée au gramme d'eau *sans perte ou travail effectué*, ni passage comme on dit à l'état de chaleur latente, la température devrait s'élever à 6800°, nombre bien supérieur à celui trouvé par l'observation, laquelle est à peu près 2500°. Calories combinaison.

Une telle différence bien constatée prouve l'absorption d'une certaine quantité de chaleur qui devient latente pendant la dissociation d'un corps ; il est facile de trouver la valeur de cette quan- Quantité rendue latente

peu plus élevé : mais, le raisonnement restant le même, nous conserverons le premier chiffre.

tité en faisant la soustraction des deux nombres cités plus haut : 3833 — 1680 = 2153 calories.

Cette immense quantité de chaleur de 2153 calories sert à donner aux gaz une force répulsive, ou plus exactement une force de projection telle qu'ils ne puissent se recombiner et former de l'eau. Les phénomènes de dissociation à des températures peu élevées sont intéressants, car ils jettent un jour tout nouveau sur les décompositions opérées par la pile, comme nous le verrons plus tard.

Quantité totale de chaleur dans les gaz.

Terminons ce chapitre en cherchant la quantité de travail ou de force vive, qui sous forme de chaleur, est *emmagasinée* dans une masse de gaz dosée de manière à pouvoir former de l'eau.

Supposons 1 kilogramme de ce mélange pris, pour nous conformer à l'usage reçu, à la température du zéro ordinaire, de la glace fondante ; cependant il serait plus logique de prendre cette masse à la température du zéro absolu, c'est-à-dire à — 273° : Nous aurons les valeurs suivantes :

L'eau, pour passer de l'état solide à l'état liquide, absorbe. . .	79,0	calories.
Pour se vaporiser à 0°.	606,5	
et si la vaporisation s'effectue à $t°$, il faudra $0{,}305t°$ calories de plus. Donc, pour élever à 100 degrés l'eau à l'état de vapeur saturée, il faudra.	30,5	
Pour porter cette vapeur à la température de 2500°, qui est celle de la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène, la vapeur devenant *vapeur surchauffée*, comme disent les praticiens, pour chaque degré, il faut ajouter 0,44 calories, ou 0,475, selon d'autres; acceptant la première valeur, qui est la plus faible, on a la quantité de calories correspondant à 2500° — 100°.	1056,0	
en ajoutant le calorique de dissociation.	2153,0	
Total.	3925,0	calories.
L'observation directe a donné pour la quantité de chaleur dégagée dans la production de l'eau par la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène	3833	calories.
en y ajoutant le calorique de fusion de la glace	79	
Total.	3912	calories.

La petite différence entre les deux nombres trouvés peut être attribuée aux incertitudes présentées par quelques-uns des coefficients employés.

Puissance mécanique correspondante.

Une calorie équivaut à 425 kilogrammètres, la quantité de chaleur obtenue représente un travail total de 1674336 kilogrammètres ou de 22381 chevaux-vapeur. Travail énorme dont nous

pouvons à peine nous faire une idée, et qui, étant employé à produire de la chaleur par un moyen mécanique, fournirait par seconde une quantité de calorique égale à celle dégagé dans le même temps par la formation de 1 litre d'eau. Cette quantité de chaleur est environ égale à celle envoyée par un tiers de mètre carré de la surface solaire dans le même temps. Quelle force incompréhensible a été déployée dans la formation des océans!

Le sujet actuel nous entraîne à faire une application de ces théories à un des phénomènes les plus intéressants de la nature. Depuis les âges historiques les plus reculés jusqu'à nos jours, la température du soleil n'a point changé, au moins d'une quantité accessible à nos procédés d'évaluation. Comment donc les pertes énormes éprouvées incessamment par l'astre central sont-elles réparées ? D'où vient la chaleur du soleil et par quel moyen est-elle réparée ?

Application au soleil.

Avant d'engager une hypothèse quelconque, remarquons que le soleil, dépensant sa chaleur, se refroidit nécessairement ; mais son refroidissement se fait avec une telle lenteur, qu'il est insensible pour nous.

En supposant que le soleil fût un globe solide en ignition, sa combustion couvrirait au plus la dépense de quelques siècles, même en supposant que la masse combinée ne fît aucun obstacle au progrès de la combustion. Si, au contraire, il est formé par une masse gazeuze à l'état de dissociation, il peut continuer à émettre chaleur et lumière pendant un temps beaucoup plus long, sans que sa température baisse d'une façon appréciable. La puissance thermique du soleil est évaluée 77000 chevaux-vapeur par mètre carré de surface. Or, 3 kilogrammes de gaz hydrogène et oxygène, en se combinant et se transformant en glace à 0°, émettent un nombre de calories équivalant à 70143 chevaux-vapeur, c'est à peu près la quantité précédente. Il suffit donc que cette masse gazeuse se combine et se condense à l'état solide par chaque seconde de temps et sur chaque mètre carré pour produire une énergie calorifique comparable à celle du soleil. Si la combinaison chimique s'effectue simplement sans être suivie de condensation ni à l'état liquide ni à l'état solide, il dégagera seulement les 2153 calories de dissociation, et, pour produire le même effet thermo-dynamique, il fau-

dra une quantité de gaz double de la précédente à peu près ; cette chaleur une fois dégagée, la masse restera encore à une température extrêmement élevée : il arrivera ici comme pour une nappe de vapeur qui se condense, et dont la température ne baisse pas, la perte étant compensée par la chaleur latente dégagée. Ceci posé, la masse solaire est de 2 quintillions de kilogrammes, soit 2×10^{30} kilogrammes, il devient donc facile de calculer combien de millions de siècles devraient s'écouler pour qu'une pareille masse dissociée parvînt tout entière à l'état de combinaison ; pendant tout ce temps, elle aura émis incessamment de la chaleur, et sa température n'aura point diminué. Le calcul a été fait et a trouvé un nombre de siècles égal à 2×10^{20}, c'est-à-dire 200 trillions !

Disons à ce propos que la chaleur émanée d'un décimètre carré de superficie solaire étant de 770 chevaux-vapeur, la chaleur développée suffirait à maintenir la puissance d'une des machines à vapeur employées à la propulsion des navires, et on a calculé que la température à la surface du soleil est de 15 à 45 fois supérieure à celle obtenue dans nos locomotives les plus puissantes. On se fera une idée de cette puissance en rappelant que la grande machine destinée au *Friedland*, qui était à l'Exposition de Paris en 1867, avait une force de 4000 chevaux-vapeur, et, pour entretenir son mouvement, il ne fallait pas moins de 8 énormes fourneaux incessamment chargés de charbon : une telle machine aurait été entretenue par la chaleur de 5 décimètres carrés de surface solaire !

Véritable source de la température solaire.

Cependant la source principale de la chaleur solaire n'est pas l'action chimique. Il est prouvé que c'est la force mécanique de sa condensation, et de la chute de sa propre masse sur elle-même en se condensant par la perte même de chaleur. M. Hall et autres ont démontré que la condensation de volume du soleil capable de diminuer son diamètre de 1″ est capable de développer autant de chaleur que l'astre en peut perdre par radiation en 18,000 ans.

La température actuelle du soleil est principalement l'effet de la condensation de sa nébuleuse : de la chute de ses parties sur elles-mêmes, de telle sorte que la gravité est la source indirecte de la vie dans notre système.

Nous voyons ainsi combien est petite notre unité de force par rapport à la grandeur des puissances mises en jeu dans la nature, et combien sont faibles les agents mécaniques dont nous disposons, lorsqu'on les compare aux forces moléculaires. Nous trouverons encore, chemin faisant, d'autres faits du même genre, et alors ne soyons pas surpris s'il nous faut admettre emmaganisée dans les atomes des gaz une force vive, par suite une vitesse et une quantité de travail véritablement prodigieuses.

Travail dans les actions chimiques.

Pendant une combinaison chimique, ces vitesses s'éteignant partiellement dans l'une ou dans l'autre des substances en réaction, se communiquent au composé formé et aux corps environnants en produisant les effets mécaniques, tels que explosions et autres phénomènes semblables. Nous ne nous étendrons pas davantage sur ce sujet pour l'instant, remarquons seulement que dans un corps composé une grande partie du mouvément de translation qui appartenait aux molécules de ses éléments constitutifs doit y rester à l'état de rotation, car pendant la combinaison le choc des atomes a certainement communiqué un mouvement de rotation aux molécules ; et cela est nécessaire pour que dans le composé obtenu solide ou liquide les molécules se comportent à la façon des corps élastiques, précisément en vertu de la rotation qui les anime.

Dissociation élémentaire de la matière.

Ces décompositions chimiques, opérées par la chaleur, viennent à l'appui d'une hypothèse déjà énoncée, d'après laquelle, par une série de décompositions successives, il ne serait pas impossible d'arriver à extraire des corps réputés simples aujourd'hui, les vrais atomes simples ou éléments constitutifs de la matière. Alors on obtiendrait une matière très-raréfiée, d'une constitution physique entièrement différente de celle que nous pouvons imaginer, d'après l'étude des corps ordinaires, lesquels présentent tous une structure extrêmement compliquée. Depuis Galilée et Newton jusqu'à nos jours, la croyance à la possibilité d'une telle décomposition est restée dans la science. Cette hypothèse permet de fournir le dernier terme à la progression des phénomènes naturels dont les premiers éléments ont été découverts successivement. A cet état la matière a été tour à tour nommée infiniment petits dynamiques, molécules μ, igniculi, corpuscules ; nous l'appellerons simplement matière raréfiée.

Éther. Rien d'impossible à ce que cette même matière soit celle qui forme le milieu universel, servant à la propagation de la lumière et nommée éther, et même il serait difficile de trouver une meilleure hypothèse pour mettre d'accord les faits observés avec les opinions des philosophes. Ainsi, pour nous, l'éther sera constitué par les atomes primitifs de la matière ordinaire. La simplicité de constitution que nous attribuons au corps simple le plus léger connu, c'est-à-dire à l'hydrogène, est certainement très-éloignée de la simplicité atomique de l'éther ; toutefois il est bon de remarquer que les corps simples formant une série dont les termes ont une constitution de moins en moins complexe, cette série doit avoir une fin : le terme extrême est l'éther ; mais il est peu probable que nous disposions un jour de moyens capables de réduire la matière à un semblable état. La matière raréfiée doit se trouver partout et les atomes composés de la matière ordinaire dans leur mouvement doivent nécessairement la choquer, l'entraîner avec eux dans leur rotation et la disposer autour de leur surface sous forme de tourbillon. Dans l'étude de la formation des corps, il faut donc tenir compte de l'influence de ces tourbillons et des pressions que peut exercer ce milieu universel. Dès lors, la théorie admise jusqu'ici est imparfaite, et nous devrons reprendre la question lorsque nous aurons établi sur des preuves suffisantes l'existence d'un milieu universel. En effet, deux molécules en rotation réunies par leur seule inertie, à la manière de deux corps durs, pour être séparés, exigeront un effort bien différent de celui qu'il faudrait employer pour les désunir si elles étaient rendues adhérentes par l'effet d'une pression extérieure comme le sont les hémisphères de Magdebourg, par exemple. Nous serions donc conduits à formuler des dénominations nouvelles pour toutes ces nouvelles manières de concevoir les forces moléculaires : cependant, pour le moment, afin d'éviter les néologismes et les périphrases inutiles nous continuerons à employer les expressions anciennes, quoique peu en rapport avec la nouvelle théorie dynamique ; en cela nous suivrons le conseil donné par Grove et nous nous servirons de ces termes comme d'expressions purement conventionnelles, destinées à représenter les différents états et modes d'action d'une seule et même cause, le mouvement. Les astro-

nomes ne font pas autrement, en conservant une grande quantité de locutions basées sur le mouvement apparent, lequel cependant n'existe pas[1].

CHAPITRE XIII

DE L'ÉCHANGE DU CALORIQUE ENTRE LES CORPS DE NATURE DIFFÉRENTE ; LOI DES ÉQUIVALENTS CHIMIQUES.

Proposition du sujet

Jusqu'ici nous avons étudié les modifications produites dans les corps par le calorique, en considérant seulement les variations survenues dans leurs propriétés physiques et leurs divers états ; autrement dit, nous nous sommes bornés à rechercher quelle était l'influence de la chaleur sur les manifestations de l'attraction dite homogène. Nous devons examiner actuellement les effets de l'attraction agissant entre corps chimiquement différents, et nommée attraction hétérogène. Ici nous aurons à rechercher successivement quelles sont : 1° les quantités de chaleur nécessaires pour élever la température des substances chimiquement différentes ; 2° les quantités de chaleur qui se développent dans les combinaisons chimiques. Commençons par l'étude des premières.

Température des mélanges homogènes

On a reconnu que généralement deux masses inégales d'une même substance à des températures différentes étant mélangées, la température résultante est la moyenne des deux températures prises par rapport aux poids des masses mélangées. Phénomène tout à fait comparable à celui observé lors d'un échange de mouvement entre corps non élastiques ; d'où une nouvelle preuve à l'appui de la théorie dynamique de la chaleur. Nous avons dit : les choses se passent ainsi *généralement*, car en réalité la capacité calorifique décroissant un peu lorsque la température augmente, la loi ne peut être absolument rigoureuse.

[1] Alors même que l'esprit serait conduit un jour à abandonner l'idée de forces diverses, à regarder tous les modes de force comme des manifestations différentes d'une seule et même force, ou à les résoudre définitivement en mouvements, il nous serait permis, néanmoins, d'employer certains termes conventionnels pour exprimer les différents modes d'action de cette force unique qui envahira tout. (Grove, *Corrélat. des forces physiques*, p. 329. Paris, 1856.)

Les corps hétérogènes.

Mais si les corps mélangés sont de nature différente, et, par suite, de capacité calorifique différente, il faut tenir compte de ces dernières, et l'énergie calorifique d'un corps a pour facteurs la masse, la température, la capacité calorifique et l'équivalent mécanique de la chaleur[1].

Cherchons maintenant quelle relation existe entre la capacité calorifique et les autres propriétés spécifiques des corps.

Relation entre la chaleur spécifique et le poids atomique.

En comparant la table des chaleurs spécifiques à celle des densités ou poids spécifiques, on n'aperçoit aucune relation entre ces deux éléments; par contre, on a découvert, nous l'avons dit plus haut, un rapport intime entre les chaleurs spécifiques et les propriétés physiques attribuées à l'attraction moléculaire; mais on est loin d'avoir établi la loi de ce rapport. Laissons donc de côté les propriétés physiques, et voyons les relations qui peuvent exister entre les manifestations thermiques et les caractéristiques chimiques. Nous pouvons alors établir facilement des rapprochements très-remarquables. En comparant le calorique spécifique d'un corps C au poids de son équivalent chimique P ou poids atomique, on trouve que le premier est maximum lorsque le second est minimnm, en telle manière que le produit $C \times P$ demeure constant. Cette importante découverte est due à Dulong et Petit, elle fait entrer toute la chimie dans le domaine de la mécanique, et nous devons nous y arrêter un instant.

1° La loi dont nous parlons, établie par les savants qui la découvrirent pour un petit nombre de métaux, a été trouvée très-approximativement vraie pour tous les autres corps simples et pour un grand nombre de substances composées; on peut donc l'admettre comme générale en faisant les restrictions suivantes :

Limitation de la loi de Dulong et Petit.

1° le produit $C \times P$ n'est pas rigoureusement le même pour tous les corps dits élémentaires, mais il varie légèrement suivant la classe et la famille auxquelles ils appartiennent; 2° pour les corps composés, le produit observé est sensiblement la somme des produits afférents à leurs composants; 3° l'état physique influe sur la valeur de ce produit.

Pour les métaux.

En opérant sur les métaux, on trouve le produit $C \times P = 3,15$[2];

[1] Rankine, *Arch. physique*, 1859, vol. V, p. 68.

[2] Nous adoptons les nombres donnés par Cantoni; ils supposent l'équivalent ou le

quelques valeurs s'écartent de cette moyenne, mais les discordances sont d'une faible importance si on les compare aux variations présentées par les facteurs du produit ; en effet, tandis que les chaleurs spécifiques oscillent entre 1 et 30,5, les produits $P \times C$ varient seulement de 2,97 (aluminium) à 3,32 (sodium).

Aux métalloïdes, tels que bore, phosphore, silicium, iode, correspondent des produits dont la valeur est assez rapprochée de la moyenne, car elle est renfermée dans les limites 2,86 et 3,43 ; mais on sait combien sont grandes les différences de structure présentées par ces corps, et, par suite, il n'est pas aisé de déterminer les éléments du produit $P \times C$; et même, en réfléchissant aux difficultés pratiques des expériences, et à la multiplicité des éléments nécessaires pour obtenir les nombres cherchés, on doit s'étonner de trouver une telle concordance entre les résultats, au lieu d'être surpris des petites différences constatées. Pour les métalloïdes.

Les corps simples liquides donnent un produit 3,69, valeur assez voisine de celle qui convient aux solides.

Avec les gaz parfaits, c'est-à-dire l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, on trouve 3,87, pourvu que l'on prenne la moitié de l'équivalent de l'oxygène[1]. Il est nécessaire de diviser par 2 l'équivalent de certaines substances pour les faire rentrer dans la loi générale, et il n'est pas difficile de comprendre la raison de cette division, car l'équivalent représente le nombre, variable d'un corps à l'autre, des atomes qui entrent dans la constitution du composé considéré par les chimistes comme le plus simple de tous ; or ce composé peut parfaitement ne pas être aussi simple que l'on veut bien le supposer ; ajoutons encore que cette division par 2 se rapporte à l'oxygène, corps simple dont nous connaissons un état allotropique, l'ozone qui, selon toute probabilité, d'après Clausius, est formée par le gaz lui-même dans un état de dissociation spécial. On peut donc soupçonner que semblable chose doive arriver pour d'autres corps, et nous citerons bientôt des preuves à l'appui de cette opinion. Pour les gaz parfaits.

poids atomique de l'hydrogène = 1. Ceux fournis par d'autres chimistes sont pris par rapport à l'équivalent de l'oxygène = 100 et se réduisent aux premiers si on les divise par 12,5. La valeur moyenne du produit est alors sensiblement 40.

[1] Ici nous adoptons les valeurs données par Hirn, pour les raisons que nous dirons ci-après.

Corps halogènes.

Le chlore, le brome, donnent la valeur 4,310 et 4,316 ; un aussi un grand écart de la moyenne générale n'est pas surprenant lorsqu'il s'agit de corps dont la simplicité de constitution est très-problématique.

Loi pour les corps composés.

2° La loi énoncée s'applique également, avons-nous dit, aux corps composés, et il est admis que le calorique spécifique d'un corps composé est sensiblement égal à la somme des chaleurs spécifiques des atomes simples dont il est formé, en tenant compte, bien entendu, du nombre relatif d'atomes. Le produit P × C varie un peu d'un composé à l'autre, mais il reste constant pour un même type de combinaison. Voici des exemples dans lesquels R représente le radical :

Substances.	Composition.	Valeur de P × C.
Sulfures.	RS.	2 × 2,98
Chlorures.	RCl^2	3 × 3,12
Id.	R^2Cl^2.	4 × 3,17
Oxydes.	RO.	2 × 2,76
Id.	A^2O^3.	5 × 2,72
Acides.	RO^2.	3 × 2,31
Id.	RO^3.	4 × 2,26
Carbonates..	CO^2,RO. . . .	5 × 2,14
Sulfates.	SO^3,RO. . . .	6 × 2,22
Nitrates.	AzO^5,R^2O. . .	9 × 2,67

Dans la dernière colonne, le premier facteur exprime le nombre des atomes du composé, et l'autre, le multiplicateur qui devrait être la valeur du produit P × C attribuée plus haut à chacun des éléments formant la combinaison. On voit que ce second facteur est généralement inférieur à la moyenne indiquée, mais la différence est faible. Toutefois on ne peut admettre le principe général posé par Garnier, à savoir que les chaleurs spécifiques de tous les corps simples ou composés sont inversement proportionnels aux poids atomiques moyens, car plus la combinaison est complexe et moindre est la valeur du second facteur ; de plus, on a observé que l'instabilité du composé varie parallèlement à la décroissance de ce facteur[1].

La loi de Dulong et Petit ne se vérifie donc pas rigoureusement. Néanmoins on a lieu d'être frappé de la valeur très-sensiblement constante du produit P × C, et on arrive à se demander : Le pro-

[1] Hirn, p. 306. Kopp. C. R. 1863.

duit $P \times C$ n'est-il pas théoriquement toujours le même, et les différences révélées par l'observation ne sont-elles pas dues à certaines causes perturbatrices?

Causes perturbatrices de la loi.

Il nous est maintenant facile de répondre à cette question après ce que nous avons exposé dans le chapitre XI vers la fin. Ces différences sont évidemment dues à des travaux intérieurs qui sont différents dans les corps différents. Ces travaux sont impossibles à détailler et à calculer, car nous ne connaissons pas la structure atomique des corps, mais nous pouvons être sûrs que, en principe, ces travaux existent et que leur influence ne peut être négligeable dans l'acte des combinaisons chimiques.

Ainsi convient-on généralement que la loi de Dulong et Petit est vraie en nature, et que les exceptions et les écarts résultent des perturbations causées par le travail intérieur. On comprend en effet combien est grande l'influence du travail intérieur sur la capacité calorifique en voyant les deux tiers environ de la chaleur communiquée à un corps être absorbée par le travail moléculaire.

Cette loi nous apprend encore que l'action chimique ne modifie pas réellement la capacité calorifique des atomes, mais que sous ce rapport les combinaisons se comportent de même que de simples mélanges. Ce qui est modifié profondément alors, c'est le travail intérieur. En effet, s'il n'en était pas ainsi, la capacité obtenue par le calcul ne serait pas d'accord avec celle trouvée par l'observation directe, pour les corps gazeux, ainsi que M. Hirn l'a démontré. Enfin, au point de vue de la pratique, cette loi nous sera utile pour fixer le véritable nombre d'atomes d'une substance qui entrent dans une combinaison, question dont la solution est difficile et que les procédés de la chimie laissent souvent fort incertaine.

Conséquences théoriques de ces résultats.

Une étude approfondie du sujet a conduit M. Hirn aux conclusions suivantes[1] : 1° Les atomes se combinent suivant deux modes distincts, ou bien les molécules se réunissent de manière à former de véritables mélanges, ou bien, au contraire, pour constituer une *unité indivise ;* 2° Les atomes des corps dits élémentaires, se combinant entre eux, donnent souvent naissance à des *molécules* fonc-

[1] Voyez Hirn, *Théorie mécanique de la chaleur*, p. 328.

tionnant comme unités atomiques, eu égard à leurs propriétés thermiques; 3° Ces molécules peuvent se former ou au contraire se dédoubler lorsque le corps contracte une combinaison avec un autre.

Disons en passant que la considération des quantités de chaleur dégagée pendant la combinaison nous décidera par exemple à adopter C^4H^8 comme formule représentative d'un composé chimique, au lieu de $C^{40}H^{80}$, bien que dans les deux notations les rapports entre les quantités de matières combinées soient les mêmes; leur signification mécanique n'est pas la même, car à la seconde correspond un moindre dégagement de chaleur, et, par conséquent, les deux formules ne représentent ni le même agencement moléculaire, ni les mêmes distances atomiques.

Tels sont les résultats fournis par le calcul et l'observation; voyons quelles déductions nous pouvons en tirer relativement aux mouvements moléculaires.

Conséquences pratiques.

Ces conséquences sont d'un grand intérêt. 1° Pour les substances qui suivent la loi de Dulong et Petit, les chaleurs spécifiques des masses chimiquement équivalentes sont égales; par conséquent la même quantité de chaleur est nécessaire pour élever à la même température des masses très-différentes, c'est-à-dire les poids de ces substances représentant leurs équivalents. Ainsi, la quantité de chaleur qui porte à une température donnée 16 grammes de soufre produira le même effet sur 28 grammes de fer, 58 d'étain, 103,5 de plomb, car tels sont les équivalents de ces corps[1].

Réciproquement ne doivent être regardées comme *chimiquement équivalentes que les masses inversement proportionnelles à leur capacité calorifique absolue*. Ainsi on arrive à reconnaître un élément d'invariabilité et de permanence dans l'action de la force thermique, de même que l'on a reconnu pour d'autres forces l'invariabilité de la masse. Et le calorimètre devient entre les mains des chimistes un instrument de mesure aussi important que la balance. Nous verrons bientôt la confirmation de notre assertion.

Capacité des atomes.

2° Les derniers atomes des corps *d'une même classe* ont la même capacité calorique (remarque déjà indiquée plus haut). En

[1] Voyez Cantoni, *op. cit.*, p. 10.

effet, d'une part, la chaleur spécifique et le poids atomique étant en rapport inverse, d'autre part le poids atomique et le nombre des atomes renfermés sous des masses égales étant aussi en rapport inverse, il en résulte que le calorique spécifique est directement proportionnel au nombre des atomes, et par suite est le même pour un égal nombre d'entre eux[1].

Récemment, M. Ledieu est arrivé à cette conclusion après des raisonnements théoriques qui reçoivent une complète confirmation des résultats empiriques que nous exposons. (Voy. les *Comptes rendus*, t. LXXVII, p. 455.)

Remarque sur les corps simples.

3° Considérant que tous les corps regardés ordinairement comme simples ne donnent pas le même produit $P \times C$, certains chimistes distingués ont regardé plusieurs d'entre eux comme réellement composés, et à leur sens les différentes valeurs du produit $P \times C$ résulteraient du nombre variable des molécules dont ils sont formés. D'où l'on conclut que les forces dont nous disposons pour analyser les corps ne nous permettent pas d'arriver aux groupes moléculaires qui sont dissemblables dans les métaux et dans les autres substances[2]. Grosham admet, d'après des expériences délicates faites sur les vapeurs que le soufre, le brome, l'iode, le chlore sont des corps composés[3].

Capacité des composés.

Finalement, abstraction faite du petit nombre des exceptions citées plus haut et en tenant compte de la faible variation subie par le produit $P \times C$, lorsque la composition des corps se complique (variation qui, pour des motifs développés plus haut, doit être regardée seulement comme une perturbation de la loi générale), il devient évident que les capacités des corps simples restent constantes lorsqu'ils entrent en combinaison, et le même fait s'observe aussi lorsqu'un atome dit élémentaire se substitue à un autre, certainement composé, tel que le cyanogène ou l'ammonium.

Loi générale.

Une conclusion toute naturelle découle de ces faits, à savoir

[1] L'égalité $Pc = P'c'$ donne $\frac{c}{c'} = \frac{P'}{P}$, et à masses égales $m = Pn$, $m = P'n'$; on a $\frac{P'}{P} = \frac{n}{n'}$, et alors, à cause de la première, $\frac{c}{c'} = \frac{n}{n'}$; si $n = n'$, on a $c = c'$.

[2] Kopp., *loco citato*.

[3] B. V., *Arch. sc. physique*, 1863, vol. XVII, p. 41.

que : pour élever à une égale température les divers atomes élémentaires, il faut la même quantité de force vive calorifique, qu'ils soient isolés ou combinés. Pour être rigoureusement vraie, cette loi exige de deux choses l'une, soit les molécules des corps dans un état de liberté complète et, par suite, toute la chaleur qui leur est fournie sert à élever leur température, soit une parfaite similitude de condition pour chacune d'entre elles. Il n'est donc pas étonnant de voir la loi de Dalton être vraie pour les gaz, corps dont les molécules sont dans une indépendance presque absolue; puis s'appliquer approximativement aux métaux, groupe de corps dans lesquels les molécules peuvent être regardées comme placées dans des conditions physiques de mobilité à peu près identiques, au moins dans les limites des expériences. Comme la structure des gaz et des métaux est différente dans ces deux cas, les produits C P ne sont pas parfaitement égaux.

Ainsi la loi énoncée est exacte, en tant que loi limite, et, pour la vérifier sur tous les corps, il faudrait les prendre à un degré de cohésion également éloigné de leurs points de fusion et de volatilisation, en un mot, dans des conditions telles, qu'ils soient tous également sensibles aux influences des forces moléculaires. Or la science est bien loin de nous donner satisfaction sur ce point; il faut donc se borner à considérer la loi comme vraie théoriquement, mais soumise dans ses applications à des perturbations résultant des causes citées plus haut.

Confirmée par Grosham.

Cette manière de voir n'est pas une pure conjecture; elle est assez rationnelle pour être admise comme un fait. Grosham[1] a trouvé que les densités des vapeurs des corps formés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène ayant pour formule $C^p H^q O^r$ prises à pression égale et à température homologue, celle d'ébulition par exemple, sont en raison directe du nombre des atomes $p + q + r$. Il a indiqué les exceptions à cette loi et a déterminé les rapports assez simples entre les valeurs divergentes dans les différents groupes. Mais pour établir ces lois, il faut prendre pour point de départ la température — 273° qui est celle du zéro absolu. Je cite cet exemple particulier seulement afin de montrer la nécessité

[1] *Arch. sc. physique*, loc. citat.

d'étudier les propriétés des corps en les plaçant dans des conditions semblables.

Nous pouvons donc admettre comme prouvé que les différentes valeurs des capacités calorifiques dépendent de la plus ou moins grande cohésion qui unit les dernières particules des corps; si les atomes étaient isolés ils auraient tous la même chaleur spécifique, c'est-à-dire qu'une quantité de chaleur donnée agissant sur un certain nombre d'atomes de corps simples ou composés déterminerait une égale élévation de température. Dans la théorie dynamique de la chaleur, cela revient à dire qu'une action mécanique étant donnée, elle produira un travail égal en agissant sur les atomes de tous les corps, toutes les fois qu'elle aura seulement à vaincre l'inertie moléculaire. Or les atomes ont des masses très-différentes les unes des autres, puisque leurs poids ne sont pas les mêmes, donc ils doivent, dans les conditions énoncées, prendre des vitesses extrêmement diverses. Et, si de la considération du travail nous passons à celle des pressions ou des forces virtuelles correspondantes pour estimer les intensités des chocs moléculaires, il en résulte que la même force doit imprimer aux molécules des vitesses inversement proportionnelles à leurs masses. Ainsi la loi de Dulong et Petit fait rentrer les phénomènes de la capacité calorifique des corps dans les lois élémentaires de l'échange du mouvement entre mobiles. En d'autres termes, la loi $P \times K = P' \times K'$ revient à cette autre $m \times v = m' \times v'$. Donc on peut conclure que, conformément à une remarque faite depuis longtemps par les physiciens sur les gaz, la vitesse dont les molécules des différents corps sont animées à une température donnée, n'est pas la même dans tous : au contraire, elle est plus grande dans ceux qui ont la plus petite masse. D'après cela, il est possible d'expliquer la mobilité très-marquée des substances dont le poids atomique est le plus faible, tel que l'hydrogène, le carbone et leurs composés, c'est-à-dire les hydrocarbures. Peut-être aussi faut-il attribuer à la petitesse de la masse et à la grande intensité de la vitesse moléculaire l'infinie variété des composés formés par les corps dont les poids atomiques sont très-faibles : l'hydrogène, le carbone, l'azote par exemple, qui à eux seuls forment un nombre considérable de combinaisons, et en particulier,

Interprétation mécanique de la loi de Dulong et Petit.

entrent dans la composition de toutes les substances organiques.

Études sur les exceptions de la loi.

La loi étant posée, il faut étudier les exceptions. La principale est relative à l'influence de la structure moléculaire, ou encore de l'état solide ou liquide de la substance, car le poids P restant constant, le produit $P \times C$ varie non-seulement pour les diverses classes de substances, mais encore pour un même corps suivant ses conditions physiques ; exemple : le diamant donne 2,05 et le noir animal 3,13; l'eau 3,00 et la vapeur aqueuse 1,16[1]. Le plomb fondu donne 4,17 et solide 3,25, etc. Cependant les éléments sont les mêmes dans les deux cas, donc l'influence de l'état physique est manifeste.

Influence de l'agrégation.

L'explication de ces anomalies nous fournit l'occasion d'appliquer les principes exposés ci-dessus. Nous avons vu que la capacité des corps pour la chaleur dépend de la mobilité particulière des molécules et du travail à effectuer pour les séparer ; par conséquent, elle change avec la puissance des liens physiques qui réunissent les molécules. Donc le produit $P \times C$ doit varier sous l'influence de toutes les conditions capables de modifier le travail de désagrégation. Nous avons déjà reconnu que la différence entre les capacités des gaz sous volumes égaux et sous pression constante résultait d'un effet de ce genre.

Et des rotations moléculaires.

Du reste, en traitant la question au point de vue de la mécanique pure, on reconnaît aisément que les divers corps, dans des conditions analogues, peuvent ne pas se comporter de même, car le moment d'inertie des molécules varie avec le mode de groupement de ces dernières.

Particularités des rotations.

Pour éclaircir ce point, il est bon de rappeler quelques principes relatifs au choc des corps animés de rotation :

1° Le choc d'un corps supposé dans les mêmes conditions que celles des atomes, c'est-à-dire animé de deux mouvements, l'un de rotation, et l'autre de translation, s'accomplit exactement comme s'il possédait un simple mouvement de rotation dont l'axe serait une ligne nommée en mécanique *axe spontané de rotation*, située à une certaine distance du véritable axe de rotation, lequel passe par le centre de gravité dans les corps complétement libres

[1] Hirn indique 37,5 et 14,2, mais ces nombres sont rapportés à $O = 100$.

dans leur mouvement. Donc, dans la détermination des percussions réciproques des atomes en rotation, on peut rapporter celles-ci à cet axe spontané et faire complétement abstraction du mouvement de translation.

2° Le choc d'un corps en rotation se fait avec toute la force qu'il possède $m \times v$, dans le seul cas où la ligne de percussion passe par le centre de gravité, et, au contraire, toutes les fois que la percussion s'exercera d'une autre manière, on n'aura d'autre percussion que celle qui est équivalente à une fraction de la masse [1].

Cette fraction est fonction de la quantité nommée en mécanique *moment d'inertie du corps*, laquelle dépend essentiellement de la figure même de ce corps. Donc, si dans un mobile animé d'un mouvement de rotation, le moment d'inertie vient à varier, l'intensité de la percussion produite par un point donné de ce corps variera

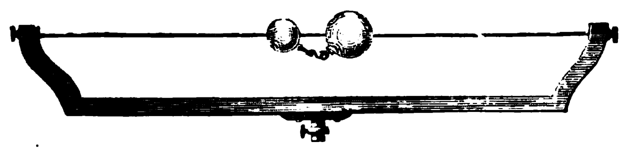


Fig. 11.

nécessairement. Élucidons ce point à l'aide d'un exemple, fig. 11 : supposons une verge en rotation dans un plan horizontal autour d'un axe vertical ; sur cette verge peuvent glisser très-librement deux boules traversées par elle, et retenues par un fil de façon à ce qu'elles restent en un point déterminé de la longueur de la verge ; le tout étant disposé comme on a coutume de le faire pour les expériences relatives à la force centrifuge. Si, pendant la rotation uniforme de l'axe, on coupe le fil réunissant les deux sphères, leur distance augmentera aussitôt, en même temps la vitesse angulaire de la verge diminuera, le moment d'inertie du système variera, et un corps frappé par un même point de la verge métallique avant, puis après la rupture du fil, aurait dans les deux

[1] Voyez Poinsot, *op. cit.*, p. 16 et 66, où il démontre que le choc maximum a lieu lorsqu'il s'exerce à une distance de l'axe spontané égale au bras d'inertie du corps estimé par rapport à ce même axe spontané.

cas reçu une impulsion différente. Supposons maintenant que les boules soient parfaitement libres d'abandonner la verge en rotation ; elles s'échapperont suivant la tangente, et le choc que pourrait produire la verge mobile sera encore autre que celui observé dans les deux cas précédents. Donc, afin d'obtenir le même effet de percussion dans les trois cas, il aurait fallu dépenser une quantité différente de travail pour mettre le système en mouvement, et on peut véritablement dire que dans ces diverses circonstances la capacité du système pour la force n'a pas conservé une valeur constante. On sait très-bien, dans la pratique, comment on obtient dans les machines une grande régularité de mouvement à l'aide du pendule conique, lequel, pour recevoir une vitesse de rotation déterminée, absorbe une quantité de force variable avec l'écartement des boules et le changement du moment d'inertie.

Applications. Ainsi donc, l'intensité du choc exercé par un corps en rotation dépend non-seulement de la masse et de la vitesse, mais encore du moment d'inertie par rapport à l'axe spontané de rotation ; de même, l'intensité calorifique est fonction de la masse des molécules, de leur vitesse et enfin de la chaleur spécifique, ce dernier élément dépendant très-probablement et selon toute apparence du moment d'inertie par rapport à l'axe spontané. Si les considérations développées présentement ne peuvent être regardées comme une explication complète des phénomènes observés dans les combinaisons chimiques et dans les changements d'état, elles jettent cependant un certain jour sur les particularités offertes par les diverses substances à mesure que leurs molécules acquièrent une plus complète liberté, ou tout au moins à mesure que faiblissent les liens qui les réunissent les unes contre les autres. Nous ne cherchons pas actuellement quelle est la nature de ces liens ; cette question sera examinée ailleurs. Dans tous les cas, on doit admettre comme évident que si les distances entre les atomes changent, les moments d'inertie des molécules changeront, et par suite il en sera de même de l'intensité des chocs qui produisent le calorique. Nous ne pouvons aller plus loin, car nous ne connaissons pas la forme des molécules, ni celle de leurs groupes. On voit par là quelles difficultés rencontre l'application des principes généraux de la mécanique aux cas particuliers de la constitution des corps. Mais

s'il ne nous est pas donné de traiter actuellement des questions aussi délicates, il ne faut pas cependant en conclure que la mécanique moléculaire des corps soit impossible à établir.

Influence du milieu éthérée

Jusqu'à présent, nous avons laissé de côté l'hypothèse de l'existence d'un milieu dans lequel les molécules du corps seraient immergées, et dont elles entraîneraient une partie dans leurs mouvements, suivant les partisans des tourbillons moléculaires. Si l'on admet l'existence de ce milieu, son action pourra être regardée comme équivalente au travail passif attribué aux forces moléculaires dans la théorie ordinaire. Lorsque plusieurs tourbillons se réuniront en un seul, le moment d'inertie, et, par suite, la rotation du système, seront évidemment modifiés. On voit donc que les considérations développées plus haut sont vraies pour tous les systèmes. A présent, il n'est pas à propos d'examiner ces suppositions, car la théorie mécaniqne est complétement indépendante des hypothèses causales qui ont été suggérées par des phénomènes d'un autre ordre.

Résumé.

Donc pour nous résumer et conclure nous pouvons reconnaître comme une loi *limite* naturelle que les différents atomes matériels, présentent une égale capacité pour la chaleur, mais que néanmoins les chaleurs spécifiques des systèmes moléculaires peuvent être différentes. Les variations éprouvées par ce coefficient lors des changements d'état et des combinaisons chimiques, peuvent résulter d'une simple modification du moment d'inertie des molécules composées et du travail nécessaire pour vaincre les liens qui unissent leurs atomes constitutifs, on peut même admettre que ce travail est employé à donner une nouvelle disposition aux diverses atmosphères distribuées autour des molécules.

Tout ce qui a été dit dans ce chapitre suppose la matière formée d'atomes distincts, fait surabondamment démontré par la chimie; et, s'il y avait encore quelque doute sur ce point, il suffirait de remarquer que les lois exposées plus haut ne pouvant se comprendre en dehors de cette supposition, suffisent pour démontrer la vérité de l'hypothèse première.

CHAPITRE XIV

DU CALORIQUE DÉGAGÉ DANS LES ACTIONS CHIMIQUES.

Puissance mécanique des actions chimiques.

L'action chimique est de toutes les sources de mouvement une des plus puissantes qui soient à la disposition de l'homme. Elle nous fournit les grands effets mécaniques utilisés dans l'art de la guerre et dans le travail des mines ; elle est le principe du mouvement produit par les machines à feu, et c'est elle qui soutient l'activité des êtres vivants. Mais l'action chimique est une force dont la nature est environnée d'une complète obscurité, et dont le mode d'action est un profond mystère; il faut donc tout d'abord examiner soigneusement quels phénomènes elle produit. Une seule chose nous est parfaitement connue, c'est que cette force n'agit jamais à distance, et que le contact (au moins apparent) est une condition indispensable à son action. Lorsque nous avons étudié une force dont la nature nous était inconnue, il nous a fallu l'estimer d'après ses effets, il en sera de même pour l'action chimique, et le dégagement de chaleur étant précisément une de ses manifestations les plus constantes, nous devons d'abord rechercher quels rapports existent entre la chaleur produite et l'intensité de l'action chimique.

Action chimique au contact.

Étude de la combustion.

Jusqu'à présent, malgré les efforts des savants et des industriels, les rapports découverts entre les actions chimiques et les autres forces régissant la matière sont peu nombreux ; cependant quelques relations ont été mises en lumière d'une façon satisfaisante, et peuvent être regardées comme des lois. Les premières recherches ayant trait à ce sujet furent celles entreprises par Rumford, Dalton et Dulong sur la combustion, phénomène d'une importance capitale dans les arts. Favre et Silberman ont récemment étendu ces investigations à un grand nombre de substances à l'aide de procédés opératoires très-délicats; et ils ont établi des principes qui, relativement aux recherches sur les quantités de mouvements moléculaires, sont aussi importants que les lois des

proportions multiples et des équivalents dans les questions de masse et de poids.

Voici un premier fait et il est fondamental : *Lors d'une combinaison chimique, la quantité de chaleur développée est toujours la même ; la valeur de cette quantité varie d'une combinaison à une autre.* Elle est indépendante de la rapidité de la combinaison ; de sorte que l'oxydation d'une certaine substance se faisant violemment et avec production de lumière, dégage la même quantité de chaleur que si elle s'opérait lentement et sans phénomène lumineux ; seulement, dans ce dernier cas, les causes de déperdition, étant très-difficiles à éviter, la quantité de chaleur semble être moindre que dans le premier, lorsqu'on se borne à un examen superficiel. Il en est de même dans les cas où le composé reste mélangé à un excès de l'un des corps prenant part à la réaction, par exemple dans les hydratations des acides, pour une certaine quantité du composé formé il se dégage une égale quantité de chaleur que la combinaison se fasse peu à peu ou d'un seul coup.

Loi fondamentale.

Non-influence de l'intensité du phénomène.

La formation des combinaisons les plus stables est accompagnée du dégagement d'une très-grande quantité de chaleur, et, par suite, cette quantité diminue à mesure que le degré de la combinaison s'élève. Sous ce rapport, voici l'ordre suivant lequel on devrait sérier les substances combustibles : potassium, sodium, zinc, fer, plomb, cuivre, argent, et pour les corps comburants, c'est-à-dire les métalloïdes, l'échelle serait chlore, brome, oxygène, iode, soufre. L'eau, formée d'hydrogène, et d'oxygène n'est pas une des substances les plus stables, comme on le croyait encore récemment ; elle a été décomposée par Grove à des températures insuffisantes pour réduire l'oxyde de zinc, l'oxyde d'argent et quelques autres corps.

Relation de la chaleur avec la stabilité des combinaisons.

Cette sériation des corps ne permet pas encore, il s'en faut de beaucoup, d'établir une mesure exacte de l'intensité de l'action chimique. En outre, comme on n'a pas jusqu'ici fourni la raison de la diversité des poids atomiques, de même il ne nous a pas encore été donné d'établir la loi de la variation des quantités de chaleur dégagées pendant les différentes combinaisons. Toutefois, comme l'on sait que les poids atomiques sont des multiples de celui d'une certaine substance (l'hydrogène), il n'est pas impossible que le

Relation de la chaleur produite avec les poids atomiques.

nombre de calories dégagées pendant les diverses combinaisons soient des multiples de la quantité produite pendant une certaine partie d'entre elles. Woods a proposé de mesurer l'affinité chimique à l'aide de la quantité de chaleur développée pendant les combinaisons, et réunissant les résultats de ses propres recherches à ceux obtenus par Silberman, il trouva que, pour un grand nombre de composés oxygénés, les quantités de chaleur dégagées par la combustion d'un équivalent chimique des diverses substancessont sensiblement multiples du nombre fourni par la combustion d'un équivalent d'iode. Ce résultat est peut-être un premier pas vers la découverte d'une loi, aussi doit-on lui accorderune grande importance.

Complication des lois.

Les lois se compliquent à mesure que le degré de la combinaison s'élève. Ainsi certains acides (azotique, chlorhydrique, bromhydrique, iodhydrique), lorsqu'ils se combinent avec la même base, produisent une égale quantité de chaleur; d'autres au contraire, et parmi eux l'acide sulfurique, en produisent beaucoup plus; en somme, pour un même acide, la chaleur dégagée varie suivant la base avec laquelle il contracte une combinaison. Les faits relatifs à ce sujet ne sont pas encore très-nombreux ; ils suffisent néanmoins pour nous faire pressentir qu'ils peuvent tous être compris dans une même formule générale. Quelle est cette loi? Jusqu'ici on n'a pu le savoir, car elle est déguisée par diverses influences défavorables, et surtout nous ne possédons pas un véritable terme de comparaison, mais assurément elle existe, l'observation suivante met la chose hors de conteste.

Influence de l'état moléculaire.

Lorsque deux sels neutres mélangés échangent leurs bases, la température ne s'élève pas toutes les fois que les nouveaux sels formés restent dissous dans les liqueurs, elle monte dans les seuls cas où l'un des deux se précipite à l'état solide ; le dégagement de chaleur est donc produit par le changement d'état, et puisque la température reste constante lorsqu'il ne se fait aucun précipité, on voit que la quantité de chaleur émise lors de la formation des nouveaux sels est précisément égale à celle absorbée pendant la décomposition des premiers. L'expérience dont nous parlons a pour analogue cette autre qui conduisit les chimistes à la notion des masses équivalentes, et dans laquelle on voit deux sels neutres

produire, par leur double décomposition, deux autres sels neutres; en outre, il est bon de la rapprocher d'une troisième, celle qui nous a appris que les équivalents ont la même capacité calorifique. En un mot, il y a équivalence constante de travail de même qu'il y a équivalence de masse (Favre). Avec le calorimètre on mesure l'énergie, et la balance sert à mesurer la masse.

Suivant l'opinion reçue, la chaleur absorbée lors de la décomposition d'un composé chimique est égale à celle dégagée pendant sa formation. Nous avons déjà vu un exemple d'absorption de chaleur accompagnant une décomposition, en parlant de la dissociation de l'eau. Si, pour se décomposer, certaines substances demandent une température très-élevée, cela tient à ce que nous devons leur donner la chaleur nécessaire pour changer d'état, c'est-à-dire que nous devons leur fournir une vitesse moléculaire suffisante pour surmonter non-seulement les liens physiques, mais encore les liens chimiques qui les retiennent en combinaison. De plus, en sortant d'une combinaison chimique, un ou plusieurs des éléments de la combinaison ne conservent pas le même état physique; donc, en déterminant la quantité de chaleur nécessaire à un corps pour se décomposer, il faudra tenir compte du nombre positif ou négatif de calories résultant de cette dernière transformation. Chaleur de combinaison et de décomposition.

Il n'est pas rare d'observer des décompositions accompagnées d'un dégagement de chaleur; le plus souvent alors la chaleur s'explique parce que, pendant la décomposition, qui regarde un des éléments, d'autres combinaisons se sont opérées entre corps doués d'une grande affinité (circonstances dans lesquelles la chaleur est produite en grande abondance comme nous l'avons dit plus haut); d'autres fois on peut attribuer l'élévation de température aux changements d'état survenus. Le premier cas se présente principalement pendant les décompositions des substances organiques donnant naissance à des composés plus fixes. Citons un exemple : la combustion du coton-poudre semble à première vue une décomposition, et elle en est une en effet, eu égard à la substance elle-même, composé assez complexe d'hydrogène, d'oxygène, de carbone et d'azote; mais en examinant les produits de la réaction, nous les trouvons formés par des corps très-stables, tels que l'eau, l'acide carbonique, Chaleur dans les décompositions.

l'oxyde de carbone, dont la formation détermine le dégagement d'une quantité de chaleur notablement supérieure à celle absorbée par la mise en liberté de l'azote et la destruction du groupe moléculaire primitif. Les substances explosives sont comparables en quelque sorte à des masses gazeuses considérablement comprimées par l'effet des forces moléculaires elles-mêmes; or ces gaz peuvent contracter ensemble des combinaisons plus intimes sous l'influence de causes déterminantes spéciales; à ce moment, l'équilibre instable des molécules étant troublé, elles abandonnent l'état forcé dans lequel elle se trouvaient pour occuper une position plus stable. Le plus ordinairement, ces transformations sont excitées par l'élévation de la température d'un point de la masse. Le même raisonnement s'applique à la combustion de la poudre à canon, avec cette particularité que dans ce cas deux substances élémentaires, le soufre et le carbone, d'abord simplement mélangées et retenues par de faibles influences physiques, entrent en combinaison pendant l'explosion; il faut même tenir compte de l'hydrogène qui occupait les pores du charbon végétal employé à la fabrication de la poudre. Ces réactions supposent à la vérité la décomposition du nitre, mais elle absorbe une quantité de chaleur beaucoup inférieure à celle produite par la formation de l'eau, des sulfates, des carbonates, des sulfures de carbone et de potassium, etc. La différence pourrait même être connue en calculant les équivalents calorifiques de chacun des composés (chose qui n'a pas encore été faite, à ma connaissance).

Chaleur due aux changements moléculaires.

Passons au second cas; quelquefois, en l'absence de toute action chimique, il se produit dans les corps un dégagement de chaleur sous la simple influence du passage d'un état moléculaire à un autre. Le fait se présente pour le phosphore, le soufre, et d'autres corps semblables. Le soufre en particulier, lorsque de prismatique il devient octaédrique, manifeste une élévation de température de 12°. Dans plusieurs décompositions chimiques, la chaleur dégagée peut être rattachée à un effet de ce genre, telles sont les décompositions de l'oxyde d'argent et de quelques oxydes métalliques, de l'eau oxygénée, etc. Cette façon de voir paraîtra encore plus exacte si l'on se rappelle que l'oxygène se présente sous deux formes, l'oxygène ordinaire et l'ozone. Enfin, dans les phéno-

mènes de ce genre, il faut tenir compte non-seulement des changements isomériques, mais encore du degré de cohésion. Ainsi le charbon à l'état de diamant ne dégage pas en brûlant la même quantité de chaleur que s'il avait été pris sous la forme de charbon végétal. En présence de ces faits, il est difficile de décider si réellement une décomposition peut être source primitive de chaleur, car on peut toujours soupçonner l'existence de certaines actions capables de donner lieu à la manifestation thermique observée; nous laissons aux chimistes le soin de trancher la question.

Chaleur développée selon l'ordre des combinaisons.

De même qu'il existe un rapport constant entre les masses formant les divers degrés des combinaisons, il existe un rapport défini entre les quantités de chaleur dégagées dans les divers ordres de réactions chimiques. Cela est nettement établi par les recherches faites sur l'hydratation des acides, spécialement de l'acide sulfurique; et, de plus, par l'examen des composés ayant des formules chimiques analogues. Ainsi, en étudiant les carbures d'hydrogène de la formule $(C^2H^2)^n$, on a reconnu cette loi que les calories de combinaisons diminuaient de 37,5 chaque fois que les éléments du carbure ($C^2H^2 = 4$ vol.) entrent une fois de plus dans la constitution du nouveau composé [1]. Ajoutons toutefois que non-seulement les proportions relatives des éléments chimiques influent sur la quantité de chaleur de combinaison, mais encore la disposition des molécules; de telle sorte que les corps isomères, formés des mêmes éléments unis dans les mêmes proportions, produisent des quantités différentes de chaleur dans les combinaisons, car la disposition intérieure est différente dans chacun d'eux. Ce fait montre une fois de plus que non seulement la quantité et la nature de la matière, mais aussi la distribution des molécules élémentaires d'un composé, influent beaucoup sur les propriétés physiques d'un corps et en particulier sur ses propriétés thermiques.

L'affinité chimique est une force définie.

Nous ne pouvons et nous ne devons pas entrer dans le vaste domaine de la chimie, puisqu'il ne nous est pas donné de le

[1] Pour les faits nombreux cités ici, voir, outre les travaux originaux, le *Manuel de physique* de Cantoni, p. 547, et le *Traité de physique* de Daguin, t. II, p. 492; 2e édition.

parcourir ; aussi les quelques indications fournies ci-dessus suffiront, je l'espère, pour montrer comment l'action chimique est une force comparable à toutes celles de la nature, c'est-à-dire une force mesurable, réductible à un travail moléculaire, et qui, de plus, a des rapports intimes avec le calorique. « L'affinité, dit Bunsen [1], en d'autres termes, la force en vertu de laquelle se réunissent les molécules de plusieurs éléments pour faire un corps composé, est, eu égard à sa nature et à son intensité, une grandeur finie, et, semblable en cela à toutes les autres forces de l'univers, elle ne peut être ni créée ni détruite. Aussi est-il inexact de dire que, dans certaines circonstances, tel corps possède une affinité, et que dans d'autres il la perd. Ces façons de parler, réduites à leur juste valeur, indiquent que dans certaines circonstances les corps sont libres d'obéir à l'attraction des forces chimiques, tandis que dans d'autres il en sont empêchés par d'autres forces contrariant l'action des premières. Ces attractions antagonistes doivent être surmontées pour que la combinaison puisse s'opérer ; elles peuvent donc être comparées en tous points aux frottements et aux résistances passives qui font obstacle à toute espèce de mouvement ; tels sont pour le courant électrique la résistance des conducteurs métalliques, pour la propagation de la chaleur la résistance des métaux dont la conductibilité est plus ou moins grande, de même pour la transmission du magnétisme, etc. Nous surmontons ces résistances et nous favorisons les combinaisons à l'aide de l'agitation, de l'élévation de la température, de l'action auxiliaire d'un troisième corps agissant sans participer directement à la combinaison (action catalytique) à l'aide de la lumière diffuse ou solaire, » etc.

Le passage qui précède, emprunté aux œuvres de l'un des chimistes les plus distingués de notre époque, nous montre sous quel aspect on doit envisager l'affinité ; il nous faut voir en elle une cause de mouvement dont l'action peut être soit contrariée par des frottements et des résistances, soit au contraire favorisée par des influences mécaniques très-variables ; conséquemment on peut lui reconnaître une origine purement mécanique. Nous chercherons ailleurs à mettre cette théorie en pleine lumière, mais

[1] *Philos. Trans.*, 1857, p. 381.

il est nécessaire d'étudier d'abord les diverses modalités sous lesquelles l'action chimique se manifeste, et pour cela nous allons examiner les autres affections de la matière.

Quelle que soit la cause des combinaisons entre corps hétérogènes dans tout phénomène de ce genre, plusieurs molécules de masse différente, abandonnant l'état de complète liberté pour concourir à la formation d'un nouveau composé, il est facile de montrer qu'un excès de force vive sera mise en disponibilité, laquelle force, ne pouvant s'anéantir, donnera naissance à un mouvement total de la masse, dont le résultat sera un dégagement de chaleur. En effet, d'après les faits exposés dans le chapitre précédent, les atomes élémentaires possèdent une égale capacité calorifique, et pour les divers équivalents chimiques, le produit de la masse par la vitesse demeure constant ; donc, lorsque les éléments sont séparés, on aura Réductible à la mécanique.

$$mv = m'v' = a.$$

Mais si, en vertu d'une action quelconque, plusieurs molécules élémentaires se réunissent en une molécule composée, celle-ci prendra une vitesse qui sera fonction des vitesses propres aux atomes élémentaires et dépendante de leurs masses. Soit u cette vitesse, d'après la loi du choc des corps non élastiques nous aurons, pour la molécule composée :

$$(m + m')u = 2a,$$

Car la quantité de mouvement du système n'a pas varié ; en effet, il a été reconnu ci-dessus que le double mouvement de rotation et de translation moléculaire étant admis, cette quantité de mouvement reste constante. Mais en additionnant le travail ou force vive dans les deux cas, la somme est différente, car elle est, avant la combinaison,

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{m'v'^2}{2} = \frac{1}{2}\left(\frac{m^2v^2}{m} + \frac{m'^2v'^2}{m'}\right)$$
$$= \frac{1}{2}\left(\frac{a^2}{m} + \frac{a^2}{m'}\right);$$

et après la combinaison elle est

$$\frac{(m + m')u^2}{2} = \frac{1}{2}\frac{(m + m')^2u^2}{m + m'} = \frac{1}{2}\frac{4a^2}{m + m'}.$$

Développement de force vive.

La première de ces valeurs surpasse la seconde de

$$\frac{a^2}{2}\left[\frac{(m-m')^2}{mm'(m+m')}\right],$$

quantité nécessairement positive pour des masses quelconques. Ainsi, après la réunion de deux atomes hétérogènes, il y a mise en liberté d'une certaine force vive qui, par conséquent, devient disponible. Le théorème est applicable non-seulement aux réactions chimiques, mais encore aux cas de juxtapositions moléculaires opérées par l'attraction dite homogène, toutes les fois que les masses formant un nouveau composé sont inégales ; il sera donc vrai lorsque des molécules solides se réunissent à celles d'un liquide, ou bien encore lorsque les molécules d'un liquide en condensent d'autres provenant d'une vapeur.

Sources de la force vive.

Nous avons déjà indiqué plus haut[1] la raison de ce dégagement de force vive, en examinant la variation éprouvée par le moment d'inertie des corps pendant la réunion ou la séparation de leurs parties constitutives. De plus, il est à présumer que dans les réactions chimiques, le calorique dégagé dépend de la forme des molécules et de leurs moments d'inertie, comme cela se présente dans les cas d'attraction homogène. Lors de ces combinaisons, la vitesse de translation peut augmenter aux dépens de celle de rotation, transformation dont nous avons déjà eu des exemples en étudiant les changements d'état, et nous trouvons là très-vraisemblablement la raison pour laquelle, au point de vue thermique, le nombre des atomes participant à une réaction subit quelquefois des variations, deux atomes pouvant se fondre en un seul.

La chaleur attribuée au frottement moléculaire.

Certains chimistes ont rapporté au frottement des molécules le dégagement de chaleur qui accompagne les combinaisons chimiques, mais cette explication nous paraît inadmissible. En effet, le frottement étant simplement une partie du travail moteur, qui dans nos machines devient travail résistant, nécessite constamment l'intervention d'une cause première ; donc, dans le cas particulier des actions chimiques, le frottement ne peut être regardé comme principe initial de mouvement, puisque son existence suppose

[1] Voyez plus haut, page 130.

l'action préalable d'une force. Une semblable hypothèse nous enfermerait dans un cercle vicieux.

La plus violente agitation règne certainement dans une masse matérielle au sein de laquelle s'accomplit une combinaison chimique, et il en résulte des frottements, si l'on veut conserver ce mot, ou, pour mieux dire, des vibrations. Or celles-ci doivent avoir leur origine dans une force qui imprime aux molécules la vitesse nécessaire ; comment donc expliquer l'existence de cette force si l'on imagine les molécules dépourvues de tout mouvement primordial ? Supposer les atomes en repos, c'est se condamner à imaginertour à tour des forces tirées du néant, puis annihilées tout à coup ; c'est admettre une série d'hypothèses absurdes. Véritable explication.

Aux yeux de quelques autres savants, les phénomènes calorifiques, observés pendant les réactions chimiques, ne sont explicables dans la théorie mécanique qu'à la condition de les rattacher à des changements de capacité calorifique et à des variations de volumes ; mais on peut voir, d'après les faits exposés jusqu'ici, la complète inutilité de semblables hypothèses. Assurément, lors d'une combinaison chimique, il s'opère dans les corps de notables changements, sinon elles seraient de simples mélanges. Voilà pourquoi l'ancienne théorie, tout en admettant l'action de forces spéciales, croyait également aux changements dus seulement à des réunions moléculaires de nouvelle formation. Mais en quoi consistent ces changements? A cette question il a été jusqu'ici impossible de répondre, car nous ne connaissons pas la nature intime des corps. Si à la constitution des corps prend part un fluide spécifique formant de petits tourbillons autour de chacune des molécules, on comprend comment une combinaison peut jeter un trouble complet dans les atmosphères des atomes élémentaires, et établir un nouveau régime dans celles des molécules composées ; il se produira donc dans la masse, à ce moment, une grande agitation. De toute façon il serait prématuré de fonder une théorie avant d'avoir étudié les phénomènes électriques et lumineux, dont l'influence sur les réactions chimiques est considérable, car cette étude nous fournira de précieuses connaissances. Réfutation d'autres opinions.

Nous voulons actuellement faire remarquer une chose impor-

Changements brusques dans les propriétés des corps.

tante, c'est une certaine discontinuité *apparente*, facile à observer dans tous les phénomènes naturels. En effet, les changements ne se font pas par degrés insensibles, mais le phénomène paraît s'établir brusquement; ainsi, lors de la solidification d'un liquide, les capacités calorifiques changent subitement. Semblable chose arrive pendant une réaction chimique. Il importe de chercher quelle est la cause de ces soubresauts dans les propriétés des corps.

Leurs causes.

Les brusques variations éprouvées par un corps en passant d'un état à un autre sont dues à des causes multiples : au moment de la liquéfaction, ils peuvent s'expliquer par la délimitation apportée à l'amplitude des mouvements de translation ; dans la solidification, rien n'empêche de les attribuer à l'orientation des axes et au changement du moment d'inertie des molécules.

La modification subite qui s'accomplit pendant une action chimique, est due certainement au moins en partie à des causes analogues; seulement l'effet porte sur des groupes moléculaires plus petits et de masse différente ; toutefois le phénomène paraît être un peu plus complexe. Ceux qui admettent les forces abstraites expliquent tous ces faits avec une grande facilité, en disant qu'ils dépendent de l'intensité des différentes forces d'affinité; mais si l'on veut donner une raison vraiment physique des phénomènes, je ne crois pas qu'il soit possible de la trouver dans les principes exposés jusqu'à ce jour.

Éclaircissons ce point théorique à l'aide d'un exemple. Parmi les phénomènes dus à l'action de force dont le mode d'action est parfaitement connu, nous voyons souvent se manifester des effets de discontinuité comparables à ceux dont il vient d'être question.

Comparaison avec la gravité.

La gravitation nous offre un cas de ce genre. Considérons un satellite tournant autour d'un astre central avec une vitesse telle que son orbe soit une ellipse : si la force de la projection augmente, l'ellipse deviendra successivement une parabole, puis une hyperbole, et alors le corps sera lancé à l'infini. Si, au contraire, la force de projection diminue progressivement, le satellite arrivera à décrire un cercle, et finira même par tomber sur le centre d'attraction. Ces cas extrêmes rompent la loi de continuité ; mais on doit remarquer qu'ils se manifestent lorsque la série de tous les états intermédiaires a été épuisée. Vraisemblablement il en est

ainsi pour les divers cas de phénomènes limites, seulement les variations intermédiaires sont comprises entre des extrêmes très-rapprochés, et deviennent, par suite plus difficiles à apprécier et à expliquer. Mais comme nous avons vu qu'entre l'état liquide et gazeux il n'y a pas une véritable discontinuité, mais seulement un passage rapide (expériences de Cagniard-Latour et Andrews) et qu'entre l'état liquide et solide, il y a comme intermédiaire de l'état pâteux plus ou moins étendu et prononcé, ainsi il doit exister des degrés de continuité entre les changements dont nous parlons, mais compris dans des bornes très-étroites.

Conclusion.

Nous reviendrons sur ce sujet lorsque nous aurons mieux examiné quelle est la nature de la matière. Il nous suffit, pour le moment, d'avoir reconnu les lois de l'affinité relativement à ses effets dynamiques ou calorifiques, et d'avoir indiqué comment, dans la théorie mécanique, on explique le dégagement de chaleur qui accompagne toute combinaison chimique, mais il reste toujours à chercher quelle est la cause déterminante de la combinaison des atomes, car toutes nos connaissances sur ce point sont insuffisantes.

Remarque sur le langage employé.

Dans cette étude, il nous a fallu recourir aux termes : forces d'affinité, forces électives, forces attractives ; expressions qui, à dire vrai, désignent simplement des propriétés occultes de la matière, et malgré la guerre déclarée par nous aux entités scientifiques, nous serons contraints encore pendant longtemps à employer les locutions consacrées. Ces façons de parler servent seulement à cacher notre ignorance, et, pour le dire franchement une fois pour toutes, « *elles ne sont que la représentation du fait à l'aide de termes convenus.* » Inutile de batailler sur ce point avant d'avoir recherché attentivement quelle est la constitution de la matière, et avant d'avoir fixé nos idées sur le point fondamental que voici : en outre de la matière tangible et pondérable, existe-t-il, oui ou non, un fluide coopérant aux phénomènes présentés par la matière pondérable ? Nous consacrerons le livre suivant à cette question ; maintenant il faut nous résumer.

CHAPITRE XV

RÉSUMÉ DU PREMIER LIVRE ET CONCLUSION GÉNÉRALE.

Dans les pages qui précèdent, nous avons exposé un nombre considérable de faits, en suivant une méthode plutôt analytique que synthétique et sans craindre de revenir plusieurs fois sur le même sujet. Essayons maintenant de dégager de toutes ces connaissances une hypothèse rationnelle sur la nature de l'agent physique produisant en nous la sensation du chaud, et de fonder une théorie non sur une conception *a priori*, mais sur l'observation des faits.

Nature du calorique : c'est un mode de mouvement.

La conclusion naturelle de l'étude à laquelle nous nous sommes livré jusqu'ici peut se formuler ainsi : *le calorique est un mode de mouvement de la matière*. Le calorique se manifestant dans tous les corps, toutes les molécules matérielles sont nécessairement animées de mouvement ; les faits les plus vulgaires nous montrent la transformation alternative du travail mécanique en chaleur, et de la chaleur en travail. Le mouvement des corps, cessant comme déplacement total de la masse, se continue comme vibration moléculaire, et *vice versâ*. La dilatation des corps, et spécialement des gaz, est l'intermédiaire ordinaire de ces phénomènes réciproques ; le travail produit par le mouvement intérieur des molécules gazeuses est même utilisé dans nos machines pour mouvoir des poids plus ou moins grands ; et dans toutes les transformations de ce genre, il se produit une perte de calorique équivalente au travail produit.

Nature de ce mouvement.

Quant à la nature du mouvement intime des corps, les atomes étant invisibles, il nous est complétement impossible de la déterminer par l'examen direct, mais l'ensemble des faits indique une agitation continuelle des parties élémentaires se faisant tantôt suivant des courbes fermées, tantôt suivant des lignes indéfinies, comme il arrive dans un véritable mouvement de projection, et on peut établir, en thèse générale, que toutes les molécules des corps sont animées d'un double mouvement simultané de translation

et de rotation. La *température* des corps est un phénomène dépendant de l'intensité du choc des molécules, et, par suite de leur masse et de leur vitesse, elle se mesure d'après l'augmentation du volume des corps, c'est-à-dire l'écartement plus ou moins grand de leurs parties intégrantes ; par conséquent, sa mesure revient à celle d'un véritable travail, accompli par les molécules elles-mêmes ; donc elle est représentée par la moitié de la force vive qui anime le système, puisqu'il en est ainsi pour tous les autres genres de travail mécanique. Le travail de dilatation est double : il est à la fois intérieur et extérieur ; en vertu du premier (l'*intérieur*) se fait l'augmentation de volume des corps et s'accroît la vitesse des molécules ; le second (l'*extérieur*) surmonte les obstacles qui peuvent s'opposer à la dilatation.

Température.

Travail intérieur et extérieur.

Le travail intérieur est toujours en antagonisme avec les liens qui réunissent les diverses parties des corps, et quelle que soit l'origine et la nature de ceux-ci, les effets produits par la chaleur sont toujours proportionnels au travail à effectuer pour les détruire, et, par suite, au mouvement imprimé à la substance, estimé d'après la quantité de force vive correspondante.

Changements d'état.

La théorie qui regarde le calorique comme un mouvement, rend parfaitement compte des divers états physiques de la matière et des phénomènes accompagnant le passage des corps de l'un de ces états à l'autre ; dans cette manière de voir, l'absorption de chaleur dont s'accompagnent la fusion et la vaporisation est considérée comme une transformation de mouvement ayant pour effet d'éloigner les molécules réunies les unes aux autres et de leur communiquer une certaine vitesse de projection suivant des orbites plus ou moins bien limitées, réciproquement il est aisé de comprendre pourquoi cette force est mise en liberté dans les changements d'état inverses des précédents.

Lois atomiques de la chaleur.

En cherchant les lois des échanges de chaleur, nous avons découvert une relation fort remarquable entre les masses des équivalents chimiques des corps et les quantités de calorique nécessaires pour produire une égale tension calorifique dans ces mêmes corps. Voici sur ce sujet les conclusions auxquelles nous nous sommes arrêté : 1° les atomes libres et isolés présentent une égale facilité au mouvement, et 2° ils sont soumis au grand prin-

cipe mécanique qui régit les échanges de mouvement en vertu duquel il y a constamment proportion inverse entre la vitesse et les masses. Nous avons reconnu combien étaient justes les idées modernes sur l'expansibilité gazeuse, et quelle utilité peut avoir la théorie mécanique dans l'étude des diverses propriétés physiques des corps. Ici-même un vaste champ est ouvert aux recherches des savants désireux d'examiner les propriétés moléculaires à ce nouveau point de vue. De nombreuses lacunes ont été rencontrées chemin faisant ; elles seront promptement comblées par le zèle des expérimentateurs, il faut l'espérer du moins, et l'auteur de ce livre s'estimera heureux si le présent travail peut appeler l'attention des chercheurs sur ces désidérata scientifiques.

Chaleur dans les actions chimiques.

Jusque-là peu nous importait le mode de production du calorique, et nous pouvions le concevoir engendré simplement par des actions mécaniques ; mais cet agent prend aussi naissance dans d'autres conditions, par exemple dans les combinaisons chimiques ; l'étude de la corrélation des forces naturelles nous a donc conduit nécessairement à examiner quel rapport existe entre les réactions chimiques et les dégagements de chaleur concomitants. Nous avons alors reconnu deux lois capitales :

1° L'*action chimique est une action définie*, autrement dit une certaine quantité d'action chimique produit toujours une égale quantité de calorique ;

2° Il existe une étroite relation entre les équivalents des composés de divers ordres et la quantité de chaleur dégagée lors de leur formation.

Ces lois, tout imparfaites qu'elles sont, nous montrent cependant que les actions chimiques, elles aussi, obéissent à une loi mécanique dont l'origine pourrait bien être la simple réunion de masses inégales, mais douées d'inégale vitesse, et possédant néanmoins une égale quantité de mouvement, lesquelles, faute d'élasticité dans leur choc, dégagent une certaine quantité de force vive.

Forces élastiques.

Ainsi, pour expliquer tous les phénomènes calorifiques, l'inertie et le mouvement suffisent. Les forces élastiques elles-mêmes, sans être regardées par nous comme complétement secondaires, ne sont pas, à notre avis, des forces primitives, la simple rotation des atomes pouvant produire des effets en tout comparables à

ceux de l'élasticité. Le problème que nous nous étions proposé est donc résolu : nous avons montré que *les phénomènes calorifiques peuvent être ramenés à de véritables transformations de mouvement* et qu'il n'est pas nécessaire de recourir à de nouveaux principes pour les expliquer.

Indépendance de la théorie mécanique.

Cette théorie est indépendante de toute idée préconçue sur la nature des liens moléculaires antagonistes du calorique. L'agrégation des molécules peut être attribuée à des causes diverses, à une force *sui generis* propre aux atomes ou à l'action extérieure d'un milieu. Le premier système est plus commode, mais il n'explique rien, puisqu'il se borne à admettre l'existence de forces spéciales dans chaque cas particulier ; le second s'efforce, au contraire, d'expliquer les phénomènes à l'aide des lois physiques du mouvement. Que l'on adopte l'une ou l'autre de ces deux hypothèses, la théorie mécanique est toujours vraie, car elle s'appuie seulement sur les communications de mouvement, et, de plus, elle est complétement indépendante des idées métaphysiques proposées par certains physiciens pour expliquer la cause primordiale du mouvement. A ceux qui nous objecteraient que la nouvelle théorie renverse par la base les principes de certaines écoles, nous répondrons que notre intention n'est pas de fournir appui à ces doctrines, un pareil soin appartenant à leurs défenseurs.

Danger des théories à priori.

Qu'il nous soit même permis de faire à ce sujet une petite réflexion. Pour peu que l'on songe à l'immense quantité de faits dont la réunion et la coordination ont dû être faites soigneusement avant d'arriver à en déduire les quelques principes formulés plus haut, on ne peut s'empêcher d'être pris d'étonnement (nous ne voulons pas dire plus) lorsqu'on voit certains physiciens assez hardis pour trancher les questions en s'appuyant sur des théories *a priori*, sans avoir aucun égard aux découvertes modernes ! Nous nous estimons heureux de voir les véritables savants suivre avec ardeur la voie pénible de l'observation. Les beaux résultats déjà acquis à la science, et ceux plus grands encore que l'on est en droit d'espérer, doivent encourager les physiciens à expérimenter sans relâche et à se livrer aux spéculations théoriques seulement pour reconnaître les lacunes laissées par leurs devanciers et susciter de nouvelles recherches.

Les physiciens-chimistes en ont déjà compris l'importance : les travaux accomplis sur la chaleur des combinaisons par M. Favre et autres, dans ces dernières années, ont déjà éclairé plusieurs points obscurs de la théorie thermo-chimique : nous ne pouvons entrer dans ces détails qui, dans l'état actuel de la science, ne peuvent encore se résumer en lois définitives. Ces travaux sont longs et pénibles, mais il ne faut pas se décourager et on doit poursuivre l'observation des détails. Le travail qui reste à faire est en chimie, l'analogue de celui qui a été fait pendant tant de siècles en astronomie — *observation patiente des détails* — sans cela l'astronomie ne serait pas faite, et la chimie rationnelle ne se fera pas. Nous sommes sûrs que le bon esprit des chimistes sera assez constant pour accélérer le triomphe d'une théorie définitive.

Difficultés qui restent encore.

Si on veut pousser plus avant la recherche des rapports du calorique avec les autres forces de la nature, on se trouvera arrêté par de graves et nombreuses difficultés, à cause de notre ignorance complète touchant la constitution intime des corps. Ici même, pour connaître tout à fait le mode d'action du calorique, nous avons fréquemment éprouvé le besoin de savoir quelles sont ces forces antagonistes dont la cohésion est l'expression. Afin de dissiper toutes les ténèbres de ces problèmes, il est nécessaire de rechercher, en premier lieu, s'il existe ou non un milieu universel imprégnant et enveloppant tous les corps, et de déterminer quelle est sa part d'action dans les phénomènes naturels.

Elles seront résolues.

L'optique, l'électricité, nous permettront de répondre à cette question, et leur étude établira la théorie de la chaleur sur des preuves non moins solides que celles ayant pour base la considération de l'équivalent mécanique de la chaleur. En effet, il résulte de nos premières recherches que la chaleur est le résultat d'une transformation de mouvement. Mais en quoi consiste cette transformation ? Tel est le point à éclaircir par de nouvelles investigations. En effet, la réflexion suivante se présente tout naturellement à l'esprit : entre le salaire d'un ouvrier et le temps de son travail, existe un coefficient constant, de sorte que c'est un proverbe reçu, *que le temps est de l'argent*, mais tout le monde comprend bien la portée du proverbe et conçoit nettement que l'un *n'est* pas l'autre. De même nous ne pouvons identifier la chaleur

et le mouvement par la seule considération de l'*équipollence* ; il nous faut encore connaître le mode suivant lequel s'opère la transformation des divers genres de mouvements en calorique.

Utilité du principe d'équivalence.

La découverte de l'équivalent mécanique de la chaleur est une donnée expérimentale établissant empiriquement la permanence du mouvement, ou son indestructibilité, au même titre que les expériences de Lavoisier ont démontré l'indestructibilité de la matière. Elle a fourni une base solide sur laquelle l'analyse mathématique a pu édifier ses formules ; et celles-ci, par leurs développements successifs, ont permis de constater la justesse du principe fondamental dans des circonstances peu accessibles à l'expérimentation directe ; telle est, du reste, le très-grand et très-réel avantage des mathématiques. Ces travaux théoriques forment un des plus beaux monuments de la science physico-mathématique de notre époque ; et au point de vue de leur importance ils soutiennent la comparaison avec ceux de la mécanique céleste, de l'optique et de l'électro-dynamie. Nous ne sommes pas dans l'intention de développer ici ces formules, mais ces notions théoriques et mathématiques devaient être éclairées par la description détaillée des faits physiques et par la connaissance du mode de cette conversion. Nous avons pu recourir à des exemples empruntés aux phénomènes acoustiques, plus tard dans l'étude des radiations, nous retrouverons de nouvelles preuves et de nouvelles analogies.

Conservation des forces.

Concluons en insistant encore une fois sur le grand principe de la conservation de la force et du mouvement. Une foule de phénomènes examinés superficiellement peuvent faire croire que les forces naturelles s'anéantissent, mais elles ne font que se transformer. Cela est évident dans la dynamique non moins que dans la statique. Un corps est-il immergé dans l'eau, il perd une partie de son poids égale à celui du volume de liquide déplacé ; est-ce à dire que la pesanteur abandonne ses droits ? Non assurément, car si le corps paraît moins lourd à la main qui le soutient, de son côté le poids du vase renfermant l'eau augmente d'une quantité correspondante, chose facile à vérifier par expérience. De même encore, dans un baromètre la colonne de mercure soutenue par l'atmosphère ne produit aucune

pression sur le fond de la cuvette ; mais si le tube est attaché à un support, ce dernier aura à soutenir une charge égale au poids du mercure contenu dans le tube barométrique, comme le prouve le baromètre à balance. Un corps en rotation suspendu excentriquement ne tombe pas, mais son axe se déplace par un mouvement conique, et c'est la gravité qui produit cet effet, comme on le voit dans la toupie, etc. Donc, souvent pour des yeux inexpérimentés les forces de la nature semblent perdre toute leur action, et cependant elles ne font que changer de forme ; il appartient alors à la science de rendre aux faits leur véritable signification.

Lacunes à combler.

Dans ce premier livre, plusieurs questions n'ont pas reçu une solution rigoureuse, car nous n'avions pas les éléments nécessaires pour traiter complétement ces problèmes. En parlant de la lumière nous compléterons nos connaissances et nous serons à même de dissiper toutes les incertitudes sur la nature de la chaleur.

Grâce aux connaissances que nous fournira l'étude des phénomènes lumineux, ces mouvements atomiques, qui échappent complétement aux yeux du corps, prendront une figure devant les yeux de l'esprit. Aussi le physicien qui traiterait de la chaleur sans tirer profit des immenses ressources que lui offre l'optique serait dans les conditions d'un observateur qui entreprendrait d'explorer la nature sans jamais recourir au sens de la vue. La seconde partie de cet ouvrage sera donc consacrée à résumer les faits principaux de l'optique.

LIVRE II

DE LA LUMIÈRE

INTRODUCTION

L'intelligence des phénomènes de la nature sera toujours impossible si nous ne nous faisons pas une idée des causes les plus prochaines qui les produisent. De celle-ci on pourra ensuite remonter aux causes éloignées, et enfin (si toutefois cela est chose permise) nous pourrons arriver à comprendre le mécanisme de l'univers. Mais parmi ces causes les plus proches, il y en a qui échappent à nos sens mis en œuvre à la manière ordinaire ; procédé qui au fond se réduit à expérimenter sur les résistances mécaniques produites par ces causes. Ce critérium manquant dans un grand nombre de cas, les phénomènes restent complétement inexplicables. Citons un exemple et des plus familiers : l'influence de l'air dans l'économie du monde n'est-elle pas restée inconnue pendant de nombreuses années ? son existence même n'était-elle pas ignorée, bien qu'elle soit très-facile à constater? Or, sans connaître les différents modes d'action de ce milieu, il était impossible d'expliquer aucun phénomène relatif à la météorologie et à la vie elle-même. D'où la croyance chez les peuples ignorants à des causes mystérieuses, à des forces surnaturelles et l'origine de nombreuses superstitions. Importance du sujet.

Aujourd'hui une semblable ignorance règne dans la science relativement au milieu général qui remplit l'univers, milieu nommé éther, au sein duquel sont plongés et agissent tous les corps. L'éther méconnu jusqu'ici.

La présence et l'influence de ce milieu, se manifestent à nous de mille manières, mais il semble que la science humaine se soit appliquée bien plus à le méconnaître qu'à le mettre en évidence, tant sont nombreuses les difficultés et les objections que l'on a soulevées autour de cette question ; on a été jusqu'à conclure à la non-existence de l'éther. On peut même s'étonner de voir certains savants, les plus éminents du reste, faire tous leurs efforts pour restreindre les cas dans lesquels il faut recourir à l'influence de ce milieu universel et ne l'adopter que lorsqu'il est impossible de faire autrement. Pour notre compte, nous pensons que de même qu'il serait impossible de rien comprendre en météorologie sans admettre la présence de l'air, il en est de même pour les autres phénomènes matériels lorsqu'on repousse l'influence de l'éther. En effet on arriva bien vite à comprendre que le vide absolu ne pouvait exister dans l'espace céleste, mais on admit seulement que l'éther enveloppait les corps, et on ne voulut pas le regarder comme un principe essentiel de leur constitution intime, de sorte que l'éther devint plutôt un obstacle à la production des phénomènes qu'une cause d'action. En définitive on fit de l'éther un véhicule passif, et par suite un obstacle aux mouvements des corps, et on n'arriva pas à l'envisager comme une des puissances les plus actives de l'univers.

Son influence réelle.

Nous croyons que l'on doit tenir compte de cet agent aussi largement que possible, toujours en restant dans le principe de l'action mécanique. Or un fluide ou un milieu peut subir deux espèces de modifications mécaniques. Dans l'une ses déplacements ne dépassent pas la limite ordinaire de l'élasticité ; en prenant ce mot dans le sens le plus étendu possible, que les mécaniciens lui donnent aujourd'hui, c'est-à-dire en désignant sous ce nom toutes les forces qui retiennent la masse dans un état d'équilibre donné de telle sorte que cet équilibre venant à être momentanément troublé il se rétablit complétement à l'état primitif. L'autre espèce de mouvements est celle dans lequel le milieu est poussé hors de ces limites, et par cela est obligé à prendre un nouvel équilibre avec disposition moléculaire différente du premier.

Sous un double aspect.

La première classe de phénomènes embrasse les mouvements vibratoires qui dans l'éther constituent la lumière et les autres

radiations ; la seconde classe comprend une catégorie de faits attribués jusqu'ici à un fluide spécial, l'électricité. Dans ce deuxième livre nous parlerons des phénomènes de la première classe, réservant ceux de la seconde pour le livre suivant.

CHAPITRE PREMIER

PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX DUS AUX RADIATIONS LUMINEUSES. PLURALITÉ DES RADIATIONS.

La lumière force multiple.

La lumière, considérée pendant très-longtemps comme un agent destiné exclusivement à mettre les êtres animés en relation avec l'univers, par l'intermédiaire du sens de la vue, est aujourd'hui comptée parmi les forces les plus puissantes de la nature. Sa faculté éclairante étant ordinairement accompagnée d'une production sensible de chaleur, tantôt on a admis une identité entre la lumière et la chaleur rayonnante, tantôt on a soutenu qu'il existait deux agents parfaitement distincts. Les botanistes avaient depuis plus d'un siècle constaté l'influence de la lumière sur les végétaux ; ils avaient reconnu que la lumière agissait non comme chaleur mais comme une force particulière, lorsque Daguerre réussit à fixer l'image éthérée observée par J.-B. Porta, le premier. Cette action fut alors mieux étudiée et mieux isolée, et à l'influence du soleil se rattacha toute une classe nouvelle de phénomènes. L'homme est ainsi arrivé peu à peu à reconnaître dans les radiations émanées de l'astre central de notre système planétaire, une force énergique qui incessamment modifie la matière pondérable, et dont il peut tirer d'innombrables et merveilleuses applications.

Exemples de cette puissance.

En effet, si nos vaisseaux sillonnent les mers sous l'impulsion des vents, la cause en est au soleil, dont les rayons maintiennent notre atmosphère en mouvement ; si les cours d'eau animent nos usines et entretiennent la vie des végétaux dans nos prairies, ils le doivent à la radiation solaire qui, par l'évaporation, élève dans les airs la vapeur d'eau des océans, laquelle va se condenser dans les hautes régions de l'atmosphère pour venir couler dans nos rivières ; si le feu réconforte nos corps, et nous rend tout-puissants

à l'aide de nos machines à vapeur, il tient cette faculté de la lumière qui a décomposé l'acide carbonique et l'a transformé en *dépôts de force.* Le moyen le plus énergique dont la science pendant longtemps disposa exclusivement pour fondre, volatiliser et décomposer les corps extrêmement réfractaires, fut la concentration des rayons solaires au foyer des lentilles et des miroirs. Aujourd'hui le physicien emploie très-souvent un rayon de lumière pour analyser les corps, pour découvrir leur structure intime. L'importance du rayonnement lumineux s'accroît encore lorsqu'on envisage ses rapports avec les autres forces de la nature, et nous devons reconnaître à la cause qui lui donne naissance une influence de premier ordre dans le mécanisme de la création ; ainsi se confirme cette notion vaguement exprimée par Kepler dans les premières pages de son livre sur l'optique, où il dit : « Tous les phénomènes de la nature doivent être rapportés au principe de la lumière. »

Limites de notre traité.

Il n'entre pas dans notre plan de faire un traité complet sur la lumière, nous voulons seulement esquisser les faits indispensables pour reconnaître la nature de cet agent, et nous mettre à même d'étudier plus à fond les problèmes laissés sans solution dans le chapitre précédent.

Trois formes des radiations solaires.

Les trois formes de la radiation, lumineuse, calorifique et chimique sont rendues évidentes dans l'expérience de la *dispersion* de la lumière, c'est-à-dire de sa décomposition par le prisme triangulaire en cristal. En effet, le spectre obtenu impressionne l'œil par ses vives couleurs, échauffe un thermoscope, et noircit un papier imprégné de chlorure d'argent ; mais ces actions diverses n'ont pas la même énergie dans toutes les régions du spectre. La figure 12 nous montre l'étendue et la courbe d'intensité de ces radiations. La lumière est à son maximum dans le jaune ; la courbe AMH traduit la loi de l'intensité lumineuse ; le maximum de chaleur est situé dans la partie obscure située au delà du rouge ; avec la lumière solaire, la courbe calorifique est BDN, et, pour la lumière électrique, elle est représentée par PRN. L'action chimique a son maximum dans le violet et plus encore dans la région obscure confinant au violet ; la courbe JKL figure la variation de l'intensité chimique. Il ne faut pas cependant imaginer que ces trois acti-

vités soient superposées comme des forces dues à des principes

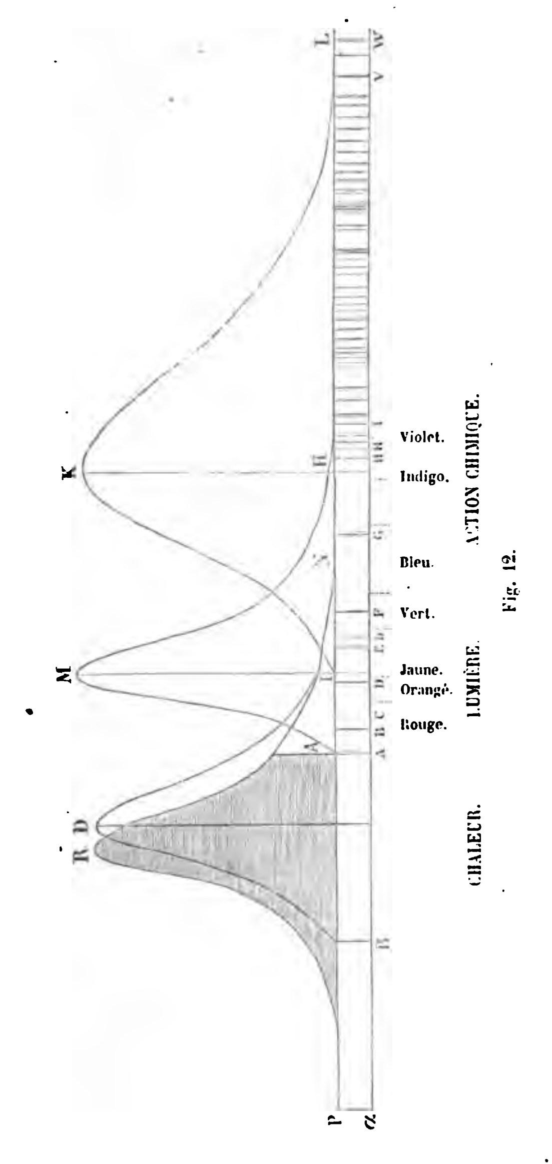


Fig. 12.

différents : ce serait une erreur. Le même rayon peut éclairer, échauffer et produire une action chimique ; le travail exécuté ne

diffère que selon l'aptitude de vibration à son unisson qu'il rencontre dans le corps, comme nous le verrons tout à l'heure. Quelques actions chimiques très-énergiques pour certaines substances dans le violet (actions photographiques) sont très-faibles dans le jaune; tandis que les actions chimiques accomplies dans les végétaux sont sensibles dans le jaune tout autant et peut-être davantage que dans le violet. Draper, en concentrant la partie plus réfrangible du spectre, a obtenu la même température qu'il avait trouvée dans la région moins dilatée du rouge. Ces expériences nous font apprécier toute l'insuffisance de l'œil pour constater l'existence d'un grand nombre de rayons placés aux deux extrémités du spectre auxquels notre rétine reste complétement insensible.

Radiations des corps terrestres.

Les différentes radiations se rencontrent en proportion variable dans la lumière émise par chacune des substances terrestres portées à un degré convenable de température, comme on peut le voir par la courbe PRN qui représente la chaleur dans la lumière électrique. En général les corps, lorsqu'ils s'échauffent, commencent à émettre des radiations obscures; celles-ci, peu à peu, deviennent lumineuses, c'est-à-dire capables d'ébranler la rétine; ce phénomène se produit vers 600° environ. Si la température est portée à un degré très-élevé, l'activité chimique des rayons et l'intensité lumineuse seront très-développées, de telle sorte que, sous ce double rapport, on obtient l'effet maximum à l'aide de la lumière électrique, dans laquelle en même temps le dégagement de chaleur est des plus considérables. Les vibrations extrêmes, propres aux corps ayant une basse température, manquent dans les rayons solaires, car elles sont absorbées par l'atmosphère terrestre et n'arrivent pas jusqu'à nous. Aussi la partie obscure du spectre est-elle beaucoup plus étendue avec la lumière électrique qu'avec la lumière du soleil. La Puissance Créatrice, inépuisable dans la variété de ses œuvres, a donné à certains animalcules la propriété de répandre une faible lumière qui semble dépourvue de rayons calorifiques; cependant, très-certainement, ils n'échappent pas à la loi commune, mais il a été impossible jusqu'ici de vérifier comment les choses se passent réellement. Les milieux aqueux des tissus organiques que traverse cette lumière à la sortie des inté-

guments animaux, absorbent sans doute la faible chaleur qui accompagne la lumière.

Analyse spectrale de la lumière

Lorsque Newton, répétant une ancienne expérience, fit passer un rayon de soleil à travers un verre prismatique[1], il reconnut le premier que les divers rayons sortis du prisme étaient indécomposables; il était réservé à Fraünhofer de démontrer la discontinuité de la lumière dans les diverses couleurs du spectre, en découvrant les raies obscures. A partir de ce moment les recherches se sont multipliées; dans ces derniers temps, le spectre solaire a été analysé à l'aide de gigantesques instruments armés d'un grand nombre de prismes, et les raies se sont montrées aussi nombreuses que les étoiles sur la voûte du ciel. On a fait la comparaison de nos sources lumineuses artificielles avec le soleil, et on a reconnu que même les plus intenses d'entre elles étaient très-pauvres en lignes lumineuses relativement à la lumière solaire. La discontinuité du spectre a été observée en expérimentant même sur la lumière venue des étoiles, et aujourd'hui l'on peut poser comme règle générale que ce phénomène se produit toutes les fois que l'élévation de température donne lieu non à une simple incandescence, mais à volatilisation et combinaison chimique. On a constaté également la discontinuité des rayons chimiques, de sorte qu'on ne peut plus les attribuer à un simple effet d'optique. Enfin grâce à l'emploi d'appareils très-délicats, on a constaté des discontinuités dans la partie obscure du spectre calorique avant le rouge ; et si au delà de la partie moins réfrangible et invisible ces discontinuités disparaissent, cela tient à cette particularité que ces rayons partent des parties du corps moins chauffées et qui ont précisément la propriété d'émettre des rayons sans discontinuité. L'explication de ces discontinuités sera bientôt développée ; pour le moment bornons-nous à signaler les faits.

Déformation du spectre par le prisme.

La distribution des diverses radiations dans le spectre prismatique est influencée par deux circonstances : la première est l'inégale réfrangibilité des rayons ; la seconde est le pouvoir absorbant de la substance réfringente. De la différence de réfrangibilité des

[1] Ce n'est pas Newton qui le premier fit cette expérience, ainsi que cela se dit ordinairement. Quelques années avant lui, Grimaldi l'avait indiquée ; mais à Newton revient la découverte de la non-décomposition des rayons colorés à l'aide d'un second prisme.

couleurs résulte du côté du rouge une grande condensation des rayons, tandis qu'à l'extrémité violette, on observe une notable dilatation ; par conséquent, la région plus éclairée du spectre ne se trouve pas en son milieu. Pour des raisons inutiles à développer ici, une distribution régulière des divers rayons colorés s'observe dans les spectres obtenus par diffraction à l'aide des réseaux au moyen desquels on obtient un spectre vraiment normal ; alors on voit la partie la plus brillante occuper le milieu de la bande colorée et les autres couleurs s'étendre à une égale distance de part et d'autre de ce point. Donc, ce spectre obtenu par réfraction n'est autre chose qu'un spectre par diffraction, auquel le prisme a fait éprouver une déformation ; cela résulte des recherches de Mossotti[1].

Influence du prisme sur le spectre thermique.

L'étendue des parties extrêmes du spectre solaire dépend de la nature du prisme qui absorbe plus ou moins telle ou telle espèce de rayons. Pour les radiations calorifiques, un prisme de verre ordinaire donne le maximum dans le rouge ; avec un prisme d'eau, ce maximum est dans le jaune ; avec un prisme de flint, le maximum passe au delà du rouge, et enfin un prisme de sel gemme rejette la chaleur bien au delà du rouge dans l'espace obscur qui le suit. L'explication de ces phénomènes ne put être donnée avant les expériences de Melloni ; celles-ci démontrèrent en effet que des substances parfaitement transparentes pour la lumière absorbent d'une manière très-inégale les rayons calorifiques, et produisent un effet analogue à celui des milieux colorés sur la lumière. Ainsi, en employant un prisme de verre rouge, puis un autre de verre vert, on obtient le maximum d'intensité éclairante en des points différents du spectre ; il en arrive de même aux rayons calorifiques lorsqu'ils traversent les différents milieux. Le sel gemme fait exception, car il est le seul corps à la fois incolore et *athermocroïque*. Une étude plus approfondie du spectre, faite par le physicien dont nous rappelons les travaux, lui a montré que si l'on employait un prisme de sel gemme, le maximum de chaleur se trouve toujours du côté du rouge, et notablement en dehors ; pour la lumière du soleil, il est placé dans un espace obscur com-

[1] Mossotti, *Recherches sur les propriétés des spectres de Fraünhofer formés par les réticules*. Pise, 1845.

plétement en dehors de la partie colorée, à une distance de celle-ci à peu près égale à celle qui, dans le sens opposé, sépare le rouge du jaune[1]; de plus, en tenant compte de la condensation des rayons dans cette partie du spectre, on peut dire que les maximum thermique et chimique sont équidistants du milieu du spectre, chacun d'eux occupant une extrémité.

Si, sur un spectre ordinaire, on élève en ses divers points des ordonnées d'une longueur proportionnelle aux valeurs de l'intensité calorifique correspondant à ces points d'après Melloni, on constate que les extrémités des perpendiculaires forment une ligne courbe. Mais en répétant la même opération sur le spectre obtenu à l'aide des réticules, on obtient une ligne droite inclinée sur l'axe des ordonnées ; le plus grand écartement des deux lignes correspond à l'espace obscur indiqué, et il va en diminuant jusqu'au violet. On peut donc conclure de là qu'après avoir passé par un maximum, l'intensité calorifique décroît régulièrement d'une extrémité à l'autre du spectre. Or, parmi les substances capables d'absorber les rayons, se trouvent les gaz des atmosphères solaire et terrestre, et dans cette dernière on doit noter spécialement la vapeur d'eau, dont le pouvoir absorbant est tellement considérable que quelques mètres de vapeur aqueuse peuvent absorber autant de rayons que toute l'atmosphère gazeuse de notre globe. Donc, la lumière solaire doit nous arriver privée de tous les rayons qui peuvent être retenus par les corps portés à une température peu élevée ; aussi la valeur de la radiation obscure augmenterait-elle très-notablement si on tenait compte de la portion interceptée. Distribution de la chaleur.

Les rayons chimiques présentent des phénomènes du même genre, leur quantité, leur dissémination, et la position du maximum d'intensité, varient avec la nature du prisme ; la dispersion est aussi grande que possible avec un prisme en quartz, et on peut avoir, sur les papiers sensibles, une impression photographique s'étendant au delà du violet, à une distance qui égale la longueur entière du spectre visible[2]. Distribution des rayons chimiques.

Le plus souvent les rayons chimiques ne sont pas visibles direc-

[1] Melloni, mém. cit. Voyez aussi la figure 12, p. 155.
[2] Voyez Bunsen et Roscoe, *Philos. Trans.*, 1859, part. II.

tement ; mais ils le deviennent en recevant le spectre sur un papier qui a été trempé dans une infusion de marron d'Inde (*æsculus hippocastanum*), ou dans de l'eau acidulée avec l'acide sulfurique et tenant du sulfate de quinine en dissolution. Les papiers ainsi préparés peuvent être remplacés par une lame de verre d'urane. Ces faits nous montrent que la matière ne répond pas également aux diverses espèces de radiations, et ils sont analogues à ceux que nous offrent les étoffes de couleur. Elles brillent d'un vif éclat lorsqu'elles sont éclairées par des rayons d'une teinte homologue à la leur, tandis qu'elles deviennent à peine visibles si la lumière est de teinte opposée [1].

Principe unique des radiations.

D'après cet ensemble de faits, il devient manifeste que si jusqu'à présent on a admis plusieurs genres de radiations, une telle distinction est basée sur la modalité particulière à chaque substance soumise à l'impression de la lumière bien plutôt que sur une vraie hétérogénéité des rayons. Pour toutes les radiations, le principe est unique ; mais il se manifeste comme lumière en influençant la rétine, comme action chimique s'il rencontre un composé sensible ; dans l'un et l'autre cas, il y a toujours un effet thermométrique concomitant. On a cru cependant observer dans quelques circonstances une production de lumière sans chaleur, mais alors on était abusé par le défaut de délicatesse des instruments, car la lumière et la chaleur sont inséparables ; la lumière étant simplement « *une série de rayons calorifiques appréciables par l'organe de la vue, et réciproquement les rayons de chaleur obscure et les rayons chimiques étant des radiations lumineuses*

[1] Les personnes les moins initiées à l'étude de la physique comprennent parfaitement qu'il doit exister une certaine différence entre la chaleur solaire et celle de nos sources calorifiques ordinaires. Je voyais un jour dans la campagne un mécanicien anglais souffrir beaucoup de la chaleur du soleil, lui qui était habitué à la température très-élevée de la cale des machines dans les navires à vapeur ; et, comme je m'en étonnais, il me répondit avec beaucoup de justesse : « *It is a quite different heat* » (C'est une chaleur très-différente). En effet, la différence existe réellement, car la chaleur solaire est accompagnée de rayons chimiques pouvant agir sur les animaux au point de changer la couleur de leur peau ; et les lumières artificielles, la lumière électrique, par exemple, agissent de même, seulement avec une énergie proportionnelle à la quantité des rayons chimiques. La sensation pénible causée par la chaleur solaire est comparable à celle que nous éprouvons lorsque notre oreille vient à être déchirée par des sons très-aigus. La lumière électrique cause des inflammations aux yeux malgré les égards pris pour s'en garantir, et cependant, à une petite distance, elle est bien moins brillante que celle du soleil.

invisibles[1]. » Cette façon d'envisager les rayons chimiques est parfaitement confirmée par une expérience curieuse : la reproduction photographique de dessins invisibles.

Ainsi il est évident que la nature d'un des éléments constitutifs du spectre une fois connue, il en sera de même pour tous les autres, et par suite le mot lumière nous servira souvent à désigner l'ensemble de ces trois radiations. Les rayons qui produisent la lumière ont été mieux étudiés que les autres, cela à cause de la facilité avec laquelle l'organe de la vue, grâce à sa délicatesse extrême, se prête à l'examen de leurs plus légères modifications, et les notions acquises à leur sujet ont permis de rechercher la nature des autres parties spectrales ; mais assurément on aurait pu commencer ces recherches sur l'une quelconque des trois variétés de radiations, si notre œil avait pour les rayons chimiques et calorifiques, la même sensibilité que pour les rayons éclairants. **Préférence pour l'action lumineuse.**

La lumière étant envisagée à ce point de vue très-général, l'importance accordée jusqu'ici à son action sur l'organe visuel a beaucoup diminué. En effet, non seulement la lumière existerait en l'absence de tout organe animal impressionné par elle, mais elle continuerait à jouer un rôle considérable dans la nature en déterminant les effets calorifiques et chimiques. Le phénomène de la vision, grâce à l'intermédiaire de la lumière, est admirable en ce que l'auteur de la nature a établi ainsi la communication des êtres animés avec le reste de la création par un moyen des plus simples et des plus ingénieux : la formation d'une image au fond de l'œil. Ce fait est pour nous de la plus haute valeur, car nous lui devons une très-grande partie de notre bien-être, et cependant le physicien doit regarder le pouvoir éclairant de la lumière comme une propriété secondaire d'un agent qui tient sous sa dépendance des phénomènes plus nombreux. Il en est de même des sons ; ils sont dus au fait général de la vibration des corps, laquelle peut agiter le sable étendu sur une plaque, et mettre des cordes en mouvement alors même que notre oreille ne perçoit aucun son. L'impression plus ou moins lumineuse d'une radiation sur la rétine est complétement indépendante des autres effets physiques qu'elle **Malgré son importance secondaire.**

[1] Melloni, *loc. cit.* à la fin.

est apte à susciter, et rien n'empêche d'admettre une inégale impressionnabilité à la lumière chez les divers animaux. Bien plus, à l'appui de cette hypothèse on peut citer le fait très-connu du daltonisme, anomalie de la vision dans laquelle les sujets affectés sont incapables de percevoir certaines couleurs, ou bien, si la perception existe, ils ne les distinguent pas les unes des autres, le rouge est confondu avec le vert, etc. Or Melloni fait remarquer à ce propos que si la vision des couleurs dépendait d'une propriété inhérente au rayon et non d'une modification spéciale de l'œil, on arriverait à cette conclusion absurde d'un rayon visible et invisible en même temps.

Corollaire important.

On voit ainsi combien il est dangereux d'établir sur la nature des agents physiques des théories ayant nos sensations pour base, et sous ce rapport nulle histoire n'est plus instructive que celle de l'optique. Combien de systèmes ne furent pas proposés à seule fin d'expliquer la vision! Les uns admettaient une force visuelle spéciale à l'organe de la vue : de l'œil partaient des rayons qui allaient en ligne droite se mettre en contact avec les objets, Les autres disaient que la vision s'opérait à l'aide de petites images lancées dans tous les sens par les objets; ceux-ci regardaient la vision comme instantanée, ceux-là comme successive, puis on supposait tantôt qu'elle s'opérait dans une certaine partie de l'œil, tantôt dans une autre. Toutes les incertitudes s'évanouirent lorsque le mécanisme de l'œil fut connu et que Scheiner fit voir l'image des objets extérieurs se dessinant sur le fond de l'œil des animaux de même que sur le verre dépoli d'une chambre obscure. A la vérité un vaste problème psychologique restait à résoudre : comment la sensation est-elle extériorée? et alors on se demanda si la vue seule, sans le secours du toucher, suffisait pour nous donner une notion exacte des objets extérieurs[1], mais malgré ces difficultés d'ordre métaphysique, l'hypothèse d'une force spéciale produisant

[1] Lisez, dans les *Trans. philos.*, 1841, p. I, l'observation d'un aveugle par cataracte congéniale, habitué à reconnaître les solides géométriques au toucher, qui, ayant recouvré la vue à la suite d'une opération, ne sut point distinguer un cube d'une sphère lorsqu'ils lui furent présentés pour la première fois, et, après les avoir touchés, fut lui-même très-étonné de ne pas les avoir reconnus. Pareillement une jeune fille, habituée à manier les ciseaux (forbici), ne les reconnait pas après avoir été opérée de la cataracte.

la vision disparut pour toujours. La question rentra ainsi dans la série des faits connus. Les théories sur la nature de la lumière pouvaient varier dorénavant, la vision restait expliquée sans qu'il fût nécessaire de recourir à une force d'une espèce nouvelle.

Puisque nous reconnaissons à la lumière une influence des plus considérables ; il devient très-important de rechercher en quoi elle consiste; tel est le sujet que nous allons examiner actuellement.

CHAPITRE II

DES DIVERSES THÉORIES DE LA LUMIÈRE. — SYSTÈME DE L'ÉMISSION.

La lumière est mouvement.

La lumière est le mouvement d'une certaine substance : toutes les écoles sont aujourd'hui d'accord sur ce principe fondamental ; mais voici le point à discuter : le mouvement est-il une translation de parcelles excessivement ténues qui, lancées par le corps éclairant, traversent l'espace avec une très-grande vitesse, arrivent à l'œil et produisent la sensation lumineuse; ou bien, consiste-t-il en la vibration d'un milieu répandu partout, nommé éther, dont les ondulations sont capables d'impressionner la rétine? La première opinion a été défendue par Newton, la seconde par Huyghens ; cette dernière est généralement adoptée aujourd'hui.

Double hypothèse.

Grimaldi, le premier, a dit clairement que la lumière était probablement un fluide en mouvement dans les milieux diaphanes, se propageant sous forme d'ondes au moins dans ces mêmes milieux. A l'appui de cette doctrine il fournit un grand nombre de preuves, entre autres ses expériences sur les franges par diffraction, et la découverte fameuse de ce fait, que, la lumière ajoutée à la lumière produit l'obscurité[1] ; phénomènes dont une explication satisfaisante ne peut être donnée en dehors de la théorie des ondulations. Il rapproche les phénomènes dont nous parlons de ceux que chacun

Preuves des vibrations.

[1] L'ouvrage de Grimaldi est connu seulement par les deux premières propositions, relatives aux célèbres expériences dont nous parlons ici. Mais on y trouve une infinité de théories physiques des plus justes, qui, de son temps, étaient complétement rejetées par les diverses écoles. On voit la porosité citée comme propriété générale de la matière, l'action du magnétisme considérée comme preuve de l'existence d'un milieu

de nous a pu observer lorsque les ondes, développées à la surface d'une eau tranquille, viennent à se rencontrer; on voit alors dans les parties qui se superposent, que si les mouvements sont de signes différents, l'eau reste immobile.

Expériences de diffraction.

Les expériences de Grimaldi sont d'une importance capitale; de plus, elles peuvent être repetées avec une très-grande facilité; aussi les rappellerons-nous succinctement. 1° On fait pénétrer dans une chambre obscure un rayon de lumière très-délié par un orifice excessivement étroit, percé avec une épingle dans une petite plaque métallique; on obtient alors un cône lumineux un peu plus divergent qu'il ne le serait si les rayons conservaient rigoureusement leur direction géométrique, et cette augmentation de divergence devient plus sensible lorsqu'on place une seconde plaque percée d'un orifice étroit à une certaine distance de la première, sur le trajet de la lumière; alors les arêtes du second cône obtenu ne sont point parallèles à celles du premier, mais elles sont encore plus éloignées de l'axe; d'où l'on conclut que les rayons lumineux, en rasant les bords des orifices à petits diamètres se dévient de la ligne droite. 2° Si l'on place un fil très-mince dans le cône lumineux sortant d'une étroite ouverture, et que l'on reçoive l'ombre de ce fil sur un papier blanc placé à une distance convenable, les côtés de l'ombre se trouvent bordés par trois franges colorées dont la largeur décroît à mesure qu'elles s'éloignent des bords, et de plus dans l'intérieur de l'ombre, on voit une ou plusieurs raies lumineuses. L'expérience devient très-élégante en plaçant dans le cône lumineux une aiguille à coudre, on voit l'image du chas être obscure au centre et lumineuse sur ses contours, la pointe de son côté paraît grossie et divisée. 3° Tous les corps opaques placés dans ce cône lumineux projettent une ombre garnie de franges à l'extérieur et éclairée à l'intérieur avec une intensité rapidement décroissante. On voit bien cela (fig. 13) en interceptant la moitié du cône lumineux à l'aide d'un écran opaque à bord mince, DC, tandis que l'autre va se projeter sur un

universel, la réfraction prismatique et la marche des rayons décomposés par les gouttes d'eau étudiées avec une exactitude surprenante. Le livre fut publié un grand nombre d'années avant Newton, de telle sorte que ce dernier put en tirer profit pour ses belles découvertes. (Grimaldi, *Physico-mathesis de lumine coloribus et iride*. Opus posthumum. Bologne, 1665, prop. 1, 2, 43.)

écran A, B (qui, sur la figure, est représenté de face en *a b*). Donc il se produit une véritable inflexion de la lumière, ou, adoptant l'expression consacrée, une *diffraction;* en d'autres termes, toutes les fois que les rayons, dans certaines conditions, rasent les bords

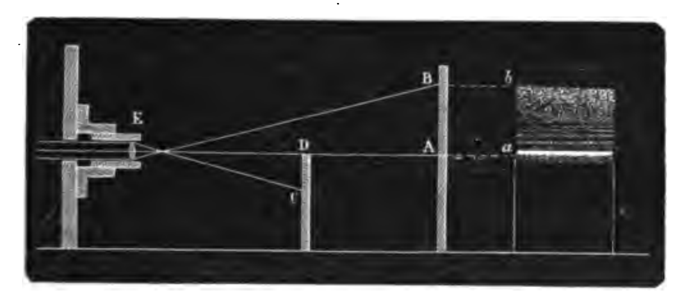


Fig. 13.

d'un corps solide, ils sont déviés vers l'intérieur de l'ombre du corps et produisent des franges.

Destruction des rayons.

Sur le trajet du cône lumineux des expériences précédentes, mettons une plaque percée d'un orifice très-fin, et examinons le contour du faisceau transmis, en le recevant sur un papier blanc convenablement éloigné; nous verrons un cercle blanc entouré d'un anneau obscur, puis un autre anneau blanc suivi d'un troi

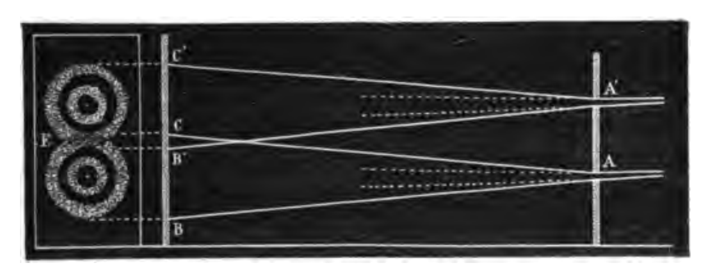


Fig. 14.

sième obscur au delà duquel se distingue encore un quatrième cercle très-faiblement éclairé ; en outre, le premier anneau blanc est beaucoup plus brillant que le cercle central. Si alors, dans la plaque de métal interposée, nous perçons un second orifice à côté du premier à une distance de 1 à 2 millimètres (fig. 14), les

images des faisceaux transmis étant reçues sur un écran à une distance telle que les deux cercles extérieurs brillants se superposent partiellement, le segment lenticulaire E commun aux deux cercles CC′, BB′ est plus sombre, présente un éclat de beaucoup inférieur à celui des parties où les deux cercles sont séparés ; ainsi la lumière du premier segment, ajoutée à celle du second, a produit de l'obscurité [1].

Les observations de Grimaldi sur les franges furent accueillies avec faveur par Newton, et il est étonnant que Huyghens n'ait point tiré profit d'expériences aussi favorables à sa théorie des ondulations. Newton, au lieu de rapporter ces déviations lumineuses à un mouvement vibratoire (cependant il admet la possibilité de la chose dans les premières *questions* de son Optique), en donna une explication fondée sur l'existence de prétendues forces attractives émanées des bords des objets et agissant à distance.

La théorie newtonienne se présentait avec tous les dehors de la simplicité, de plus elle était patronnée par un grand nom ; aussi eut-elle tout d'abord de nombreux partisans ; mais, examinée à fond, elle ne se montra pas aussi simple qu'on pouvait le croire à première vue. Les personnes désireuses aujourd'hui de renouveler cette doctrine, ne nous paraissent pas avoir fait cette observation.

Examen du système de l'émission.

Nous croyons donc utile d'examiner ce système avec un peu de soin. Nous établirons le parallèle entre les deux théories, et nous montrerons que toutes les forces imaginées par Newton, afin d'expliquer les phénomènes, peuvent être remplacées par les conclusions qui dérivent de la théorie du mouvement ondulatoire ; en outre, nous tirerons de cette comparaison des notions qui nous seront d'un grand secours, lorsque nous traiterons des cas ana-

[1] La distance de l'ouverture du volet à la première lame peut être d'environ 2 mètres, et cette longueur mesurera encore à peu près l'écartement de la plaque et de l'écran, pour des orifices ayant moins de 1 millimètre de diamètre et placés à 2 millimètres l'un de l'autre. Il est, du reste, facile de trouver par tâtonnement les distantances convenables. L'expérience que nous citons est généralement assez mal décrite dans les traités de physique. Ajoutons qu'aujourd'hui pour produire les phénomènes de diffraction, on fait arriver la lumière non plus par un orifice circulaire d'un très-petit diamètre, mais par une fente étroite munie d'une lentille à court foyer. (Voyez figure 13.)

logues en divers autres points de notre sujet. Notre conduite n'est pas dictée par le désir de faire une critique aujourd'hui inutile des idées anciennes, mais nous voulons montrer qu'en optique, de même que cela arriva fréquemment dans l'étude de la philosophie naturelle, on imagina d'abord des *forces* spéciales pour expliquer les phénomènes, puis lorsque les faits furent mieux connus, on reconnut qu'ils se déduisaient très-simplement des lois mécaniques du mouvement.

1re difficulté tirée de l'identité de vitesse.

1° Pour rendre compte de la propagation de la lumière, on supposa l'espace rempli par une infinité de corpuscules lancés avec une vitesse de 300,000 kilomètres, et, chose plus étonnante, on accepta que les particules lumineuses étaient projetées avec la même vitesse par les corps portés au plus haut degré de l'incandescence, les astres, par exemple, et par ceux doués comme les vers luisants, du plus faible pouvoir éclairant. Une telle hypothèse nous paraît inadmissible, car la violence de l'impulsion doit être proportionnelle à l'intensité du mouvement dont les corps sont animés, et on ne peut la supposer égale dans tous. Cette difficulté disparaît dans la théorie des ondulations. En effet, la propagation de la lumière étant semblable à celle du son dans l'air, la vitesse dépend uniquement de l'élasticité du milieu, et n'a aucun rapport avec l'intensité de la vibration, celle-ci étant déterminée par l'amplitude plus ou moins grande des oscillations de la molécule vibrante et par suite des particules du milieu ambiant. Donc, dans la seconde hypothèse, la lumière, qu'elle provienne d'une source intense ou faible, doit se propager avec une égale vitesse, de même que cela se présente pour les sons forts ou faibles, aigus ou graves.

2e difficulté tirée de la réflexion des rayons.

2° Voulant expliquer la réflexion, Newton admit des forces répulsives particulières qui, émanant des molécules placées à la surface des corps, repoussaient les particules lumineuses avant qu'elles fussent arrivées réellement au contact des corps. De cette façon, la réflexion était possible malgré les aspérités de la surface; car il n'échappa pas à Newton que entre les particules lumineuses et ces aspérités, il existe une plus grande disproportion que celle dont on pourrait se faire idée en supposant les plus hautes montagnes frappées par des billes de billard.

Le subtil philosophe comprit combien dans son système était impossible une explication de la réflexion fondée entièrement sur les principes de la mécanique, et il tourna la difficulté en admettant certaines forces répulsives dont il lui était impossible d'assigner la nature. Ces forces sont bien différentes de celles désignées sous le même nom dans le chapitre précédent, lesquelles résultant de l'agitation extrême des molécules de la surface, loin de favoriser la réflexion, ne peuvent que contribuer à la rendre plus irrégulière.

Dans le système des ondulations, il n'est pas nécessaire de faire intervenir de semblables forces ; car la lumière devant se réfléchir de même que le son, il suffit de savoir si les ondes lumineuses sont d'une longueur suffisante pour pouvoir se réfléchir régulièrement à la surface des miroirs malgré les aspérités de ces derniers. Or la longueur de l'onde jaune a été trouvée 5 à 6 fois plus grande que l'épaisseur d'une feuille d'or battu : elle est donc plus longue que les rugosités de la superficie des corps polis ; ajoutons que Faraday, par des procédés chimiques, a obtenu des feuilles d'or ayant une épaisseur égale à $\frac{1}{50}$ de la longueur de l'onde jaune[1].

3° difficulté tirée de la réfraction.

3° La théorie de l'émission rencontra un écueil sérieux lorsqu'il lui fallut donner l'explication de la réfraction. A cet effet, Newton imagina que la lumière dans l'intérieur du corps était attirée avec une force prodigieuse dont l'intensité devait être mille billions de fois plus forte que celle de la pesanteur[2] ; cette attraction déviait le rayon de la ligne droite, le pliait en quelque sorte, et en même temps elle devait augmenter la vitesse de propagation dans l'intérieur des substances les plus réfringentes. La confirmation de cette vue théorique dépendait donc de la détermination de la vitesse de la lumière dans les différents milieux. Les expériences faites longtemps après par Arago et Fresnel ont montré que la vitesse de la lumière est moindre dans les corps très-réfringents et très-denses que dans les autres ; ces résultats étant con-

Vitesse de la lumière moindre dans les corps plus denses.

[1] Faraday, *Philos, transact.*, 1857, p I, p. 145.

[2] Newton, *Optique*, édition de Londres, 1706, page 321. Le nombre est 1,000,000,000,000,000

traires à ceux indiqués par la théorie de Newton, celle-ci devient inadmissible. Au contraire, une moindre vitesse de propagation dans les milieux les plus denses, telle est la base sur laquelle est fondée l'explication de la réfraction dans le système de Huyghens; et le fait ayant été trouvé exact par l'expérience, la théorie des ondes trouve ici une preuve solide en sa faveur.

4° objection tirée de la diffraction.

4° Newton rendit compte des phénomènes de diffraction observés par Grimaldi en invoquant des forces répulsives spéciales; et même, dans ce cas, il accorda à ces forces la faculté d'exercer leur action à une certaine distance des corps, et avec une espèce d'alternative rhythmée[1]. Cette hypothèse était nécessaire pour expliquer comment les franges pouvaient exister au nombre de trois et se développer en dehors des corps, avec la loi d'alternance que nous avons signalée. Il admit de semblables oscillations sous le nom d'*accès* de facile réflexion et de facile transmission, pour expliquer les couleurs présentées par les lames minces. Pour ceux-ci, il était assez disposé à attribuer cet accès aux vibrations calorifiques des corps[2].

On ne peut se lasser d'admirer la fécondité d'imagination déployée par Newton dans la création des hypothèses destinées à expliquer cette masse énorme de faits, qui, grâce aux travaux des géomètres modernes, se déduisent avec une merveilleuse facilité du système des ondulations. Assurément, on peut dire à ce sujet : *Si Pergama dextra defendi possent... hac defensa fuissent*, et ceux qui de nos jours songent à ressusciter la théorie de l'émission devraient au moins, à l'exemple du grand philosophe anglais, se préoccuper de satisfaire à toutes les exigences des phénomènes de l'optique moderne.

5° objection tirée de la polarisation des rayons.

5° Mais la sagacité du savant physicien fait un dernier effort lorsqu'il tâche d'expliquer comment un rayon lumineux tantôt se dédouble, tantôt reste simple en traversant un cristal de spath d'Islande, posé en travers sur un autre de même substance. A cette fin, il suppose : 1° les rayons limités par de véritables faces; 2° les molécules lumineuses douées de pôles semblables à ceux

[1] Les rayons qui passent le long d'un corps ne s'infléchissent-ils pas plusieurs fois en divers sens par un mouvement semblable à celui d'une anguille? (Newton, *Optique*, question III.) (*Note du traducteur.*)
[2] *Ibid.*, question XXI.

des aiguilles aimantées, et qui tantôt favorisent leur passage à travers les pores des substances, d'autres fois, au contraire, s'y opposent. Chose singulière, cette hypothèse renfermait en germe une notion admise encore maintenant dans la théorie des ondulations. Toujours est-il qu'elle ne pouvait expliquer clairement la double réfraction, si ce n'est en supposant, sans la prouver, dans les rayons, une propriété essentielle d'une nature parfaitement inconnue. Au contraire, Huyghens, en considérant l'onde comme se dédoublant dans l'intérieur du cristal en une onde sphérique et une autre ellipsoïdale, donnait de tous les phénomènes une raison parfaitement géométrique. Il ignorait cependant la véritable cause de ce dédoublement, et Newton se fondait sur l'incertitude du principe fondamental pour repousser les explications du savant hollandais ; mais la solution de cette difficulté dépassait les connaissances mécaniques de l'époque, et nous verrons plus tard comment elle a été trouvée. Il est singulier qu'un géomètre aussi profond que Newton n'ait pas été convaincu par l'analyse élégante de Huyghens, et qu'il ait pu se borner à admettre les rayons doués naturellement de la double réfrangibilité[1].

Objection contre les ondulations.

Newton adressait deux objections principales au système des ondes : 1° il disait que les ondes devaient se répandre dans tous les sens, contourner les corps opaques, et dès lors il ne devrait pas y avoir d'ombre sur les contours des corps de cette espèce ; 2° il rejetait l'existence d'un milieu occupant tout l'univers, car ce milieu opposerait une résistance au mouvement des planètes. Mais cette seconde objection pouvait être retournée contre lui, car on pouvait lui répondre que, d'après son hypothèse, les espaces célestes ne devaient pas être vides, étant traversés incessamment par une quantité innombrable de molécules émanées de toutes les sources lumineuses qui rayonnent les unes vers les autres.

Solution.

Nouveau principe d'Huyghens.

Quant à l'autre objection, on voit que Newton ne tenait aucun compte du principe fondamental sur lequel se fondait Huyghens pour résoudre le problème et prouver que la lumière ne doit point contourner les obstacles, principe dont nous parlerons bientôt ;

[1] *Optique*, question XVII, p. 299. Les belles découvertes d'Huyghens en optique contrastent avec les opinions beaucoup moins exactes qu'il professait au sujet de la gravitation. Tant il est vrai que *non omnia possumus omnes*.

cependant Huyghens lui-même assurait qu'il s'était décidé à admettre le système des ondes seulement après avoir établi ce théorème. Du reste, toute difficulté disparaît en examinant les analogies qui nous sont offertes par l'acoustique ; on a reconnu en effet la formation de véritables ombres sonores ; et d'ailleurs les franges de Grimaldi ne démontraient-elles pas un infléchissement des rayons autour des corps opaques ?

Théorie newtonienne inadmissible.

L'*Optique* de Newton est assurément un monument impérissable de son immense génie, mais il est permis de comparer cette œuvre à une machine qui ne fonctionne bien qu'entre les mains de son inventeur. L'arc d'Ulysse ne pouvait, dit la fable, être bandé que par le héros ; de même, pour la théorie matérielle de la lumière, le grand Newton était le seul mathématicien assez puissant pour adapter sa théorie aux divers phénomènes à l'aide d'hypothèses ingénieuses. Le grand nombre de forces particulières nécessaires pour expliquer chacune des nouvelles découvertes, voilà le côté faible du système ; aussi les inconvénients grandissaient à mesure que les observations se multipliaient et que les phénomènes devenaient plus compliqués. Les plus chauds partisans se déclarèrent vaincus lorsqu'il leur fallut aborder la théorie de la polarisation et de la double réfraction, et ils furent contraints d'adopter l'hypothèse des ondulations, qui, seule, permet de ramener tous les faits connus à des lois simples bien supérieures aux notions incomplètes fournies par la doctrine de l'émission[1].

Laissons donc de côté la théorie newtonienne et cherchons à faire comprendre le système des ondulations, en nous occupant spécialement des points utiles à notre sujet et renvoyant aux traités spéciaux pour la démonstration d'un grand nombre de théorèmes.

[1] Pour citer une seule preuve, Herschel, dans son Traité sur la lumière, arrivé à la polarisation et à la double réfraction, se décide positivement en faveur de la théorie des ondes.

CHAPITRE III

SYSTÈME DES ONDULATIONS. — NOTIONS SUR L'ÉTHER.

Milieu interplanétaire de Kepler.

Képler est vraiment le premier astronome qui ait invoqué un milieu planétaire pour expliquer les mouvements des astres, et en combinant le mouvement circulatoire de ce milieu avec sa poussée centrale, il essaya d'expliquer les lois des planètes, et d'y rattacher la propagation de la lumière, de la gravité et du magnétisme. Ces théories étaient trop au-dessus de la mécanique de son temps pour avoir quelque influence sur les progrès de la mécanique céleste, mais elles aidèrent puissamment à la découverte de la véritable nature de la lumière.

École cartésienne.

L'idée de ce milieu universel, mal comprise par son auteur, se perfectionna dans l'école cartésienne, et déjà, Malebranche pensait que les couleurs, au lieu d'être une propriété absolue des rayons lumineux comme le voulait Newton, dépendaient de la différence des longueurs d'ondes propres au milieu dans lequel elles se propageaient [1]. Cette hypothèse trouva dans Huyghens un géomètre qui sut élever les vagues conceptions des métaphysiciens à la hauteur de vérités mathématiques [2].

Huyghens.

Exposition du système.

Suivant la théorie ondulatoire, nous l'avons déjà dit, la propagation de la lumière se fait par une suite de pulsations ou oscillations d'un fluide impondérable nommé éther ; le mode de transmission est donc en tout point comparable à celui des ondes sonores dans l'air atmosphérique. La longueur de l'onde lumineuse détermine la *couleur*, de même que celle de l'onde aérienne fait la *hauteur* du son, et de l'amplitude des oscillations des atomes éthérés dépend l'*intensité*, comme de l'amplitude des oscillations accomplies par les molécules d'air résulte la force d'un son. On nomme rayon lumineux toute droite menée du point lumineux perpendiculairement à la surface de l'onde. La réflexion s'explique de la même manière que celle du son, et la réfraction dépend de la moindre vitesse de la lumière traversant un milieu

[1] Priestley, *History of vision, light and colours*. London, 1772, p. 240.
[2] C. Hugenii *Opera*. Amsterdam, 1720, vol. I, spécialement, p. 14.

plus réfringent. Les démonstrations géométriques de ces divers phénomènes données par Huyghens sont encore les plus élégantes et les plus simples de celles connues jusqu'à aujourd'hui.

Principe fondamental de Huyghens.

Parmi les objections que Newton adressait à la théorie des ondes, nous avons ci-dessus indiqué la plus importante : Comment, disait-il, la lumière solaire, en pénétrant dans une chambre obscure par un orifice circulaire, peut-elle former un faisceau cylindrique? Si elle consiste en ondulations, elle devrait se répandre dans tous les sens comme le son. Huyghens réfuta cette objection avec une simplicité admirable, en établissant le théorème véritablement fondamental de la théorie qui nous occupe. Voici sa proposition, nommée depuis principe d'Huyghens (fig. 15) : Toutes les fois qu'un

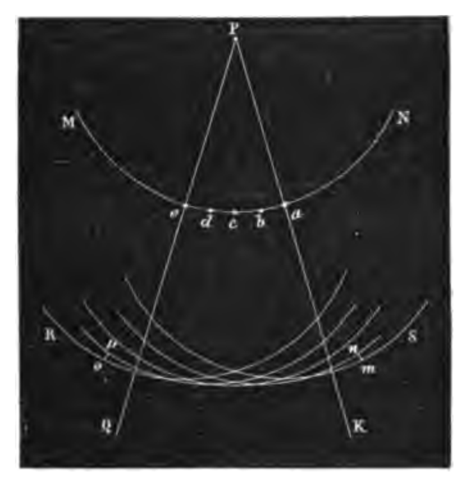


Fig. 15.

point unique P met en vibration un milieu élastique homogène, il développe autour de lui une onde de forme sphérique MN ; mais en réalité une seule onde est incapable de nous donner la sensation de la lumière qui, toujours, est produite par plusieurs ondes successives et par plusieurs points vibrant simultanément; alors les mouvements s'ajoutent les uns aux autres et déterminent une impression assez forte pour donner naissance à une sensation lumineuse. La direction du rayon est donc celle de la résultante

de tous ces mouvements, et voici la manière de la déterminer. On peut regarder tous les points *abcde* de la surface d'onde considérée dans une certaine position MN comme autant de centres d'ébranlement produisant des ondes sphériques secondaires qui s'étendent toutes avec une même rapidité : celles-ci auront une certaine surface enveloppe RS, qui sera l'onde générale représentant l'onde primitive MN parvenue en RS à une certaine distance du point lumineux P. Or les ondes partielles figurent autant de sphères ayant chacune leur centre en des points différents, et dont les surfaces s'écartent rapidement les unes des autres et cessent bientôt de pouvoir être tangentes à une même surface, comme cela se voit facilement en *op* et *mn*. Un plan tangent simultanément à plusieurs ondes élémentaires ne peut exister dès lors que dans un point infiniment voisin de la ligne droite qui joint le point lumineux P au nouveau point pris pour centre. Les éléments déterminés avec cette condition seront donc parallèles à la surface sur laquelle sont placés tous les centres d'ébranlements *abcde*, et cette surface étant sphérique, la surface enveloppe RS, sera également sphérique. Il suit de là que la portion d'onde comprise entre les droites P*e*Q et P*a*K conserveront toute leur intensité en superposant leurs effets d'une manière concordante, tandis que, pour les parties de l'onde situées en dehors de ces lignes, elles seront : 1° trop dilatées et trop isolées pour impressionner la rétine, et 2° elles se détruiront réciproquement, car les parties en mouvement, dans un sens positif par exemple, se superposeront aux parties accomplissant leur excursion dans le sens négatif ; conséquemment les ondes s'éteindront mutuellement. En effet, chacune des ondes ayant une phase positive et une négative, il arrivera qu'en un point quelconque *m*, situé hors du cône QPK, on aura le mouvement positif de la première onde partie de *a*, puis le mouvement négatif parti de *b*, par conséquent les deux vitesses se détruiront. Mais on voit que cette destruction mutuelle des ondes lumineuses ne sera pas complète partout, et que, dans le voisinage des ombres géométriques Q et K, on observera des alternatives de renforcement et de neutralisation qui nous expliquent l'origine des franges. Ces franges seront d'autant moins sensibles que le nombre des centres lumineux primitifs, tels que P, sera plus grand, car les

ondes émanées d'un système nombreux de points détruira l'effet de celles émises par un autre système.

Confirmation du principe.

Le principe d'Huyghens a été confirmé d'une manière remarquable par les découvertes modernes sur les réseaux. Dans les expériences que nous rappelons, on voit les parties des ondes, éloignées de la ligne droite suivie par le rayon qui traverse une ouverture très-étroite se renforçant mutuellement d'espace en espace, produire des franges colorées à une grande distance de l'axe du rayon, tandis que, en d'autres points, elles s'entre-détruisent et forment des bandes obscures. On explique de même la dilatation conique éprouvée par un pinceau de lumière lors de son passage à travers un orifice étroit, dilatation dont le degré augmente à mesure que diminue le diamètre du trou, et par suite la portion de la surface de l'onde interceptée qui a donné naissance aux ondes transmises ; si le pinceau lumineux avait été plus large, la destruction du mouvement latéral aurait été plus complète. Donc, puisque l'orifice le plus petit peut renfermer encore une infinité de nouveaux centres d'ébranlement, il est nécessaire de réduire autant que possible ses dimensions pour obtenir un effet de dilatation appréciable.

Principe des interférences.

La destruction réciproque des mouvements ondulatoires, indiquée par Grimaldi, mise à profit par Huyghens fut généralisée par Young, qui en fit sortir le principe des *interférences*, c'est-à-dire de la destruction mutuelle de deux rayons[1]. Ce principe s'applique à deux rayons de même origine, autrement dit à deux systèmes d'ondes développées par une même surface lumineuse, et il nous apprend que si l'un des deux systèmes retardant sur l'autre d'une demi-longueur d'ondulation, ils viennent à se superposer, les phases positives du premier coïncideront avec les phases négatives du second ; alors les mouvements se neutraliseront : il y aura obscurité. Si, au contraire, le retard est de deux demi-longueurs d'ondes, c'est-à-dire d'une onde entière, il y aura renforcement des ondes de l'un des systèmes par celles de l'autre, les phases de même ordre étant concordantes. Inutile d'ajouter que, par des

[1] *Interférence* vient du mot anglais *interfere*, qui signifie *intervenir, troubler, influencer, gâter*, etc.; *interposer une action quelconque* dans une opération, favorable ou défavorable.

raisons semblables, il y aura destruction de mouvement pour tout nombre impair de demi-longueurs et au contraire renforcement pour tout nombre pair.

Application du principe.

En faisant interférer les rayons à l'aide de procédés variés, puis mesurant les distances parcourues par chacun d'eux, on a pu vérifier l'exactitude du principe énoncé et expliquer une infinité de phénomènes, tels que les franges de Grimaldi, la destruction de la lumière dans le cas de deux rayons traversant deux fentes très-minces et fort rapprochées, ou réfléchies par deux miroirs inclinés, les phénomènes des anneaux offerts par les lames minces. Fresnel, l'auteur de toutes ces recherches, eut soin de supprimer toute influence que pourraient exercer les bords des objets, et ainsi il n'avait nul compte à tenir de la force répulsive qui, suivant Newton, émanait de ces bords. Dans une série d'expériences faites avec la collaboration d'Arago, il obtint le déplacement des franges en fixant une petite plaque de verre devant l'une des ouvertures étroites qui admettaient les rayons, et il en conclut que, conformément à la théorie d'Huyghens, la lumière se propageait dans le verre plus lentement que dans l'air, le verre étant plus réfringent que l'air. Cette vérité a été de nos jours mise en plus grande évidence par les expériences de Fizeau et Foucault.

Longueur des ondes quadruple des accès de Newton.

Les phénomènes d'interférence permirent de mesurer la longueur des ondes. On trouva que pour une certaine couleur la longueur était exactement quatre fois plus grande que la valeur admise par Newton pour la distance des accès dans les lames minces. Ce rapport établit une relation vraiment admirable entre des phénomènes très-divers en apparence et dont la doctrine newtonienne fournissait une explication vague et sans aucune liaison avec les autres parties de la théorie générale. Aussi sa connaissance fut-elle d'un grand secours lorsque plus tard on découvrit la polarisation chromatique[1].

Rapports des ondes extrêmes.

La détermination de la longueur des ondes offre un intérêt tout spécial au point de vue de la distinction des rayons. Les ondes colorées diminuent d'étendue depuis le rouge jusqu'au violet, par

[1] Les franges avec la lumière solaire sont colorées, à cause de la différente largeur des ondes élémentaires. En employant une lumière monochromatique, on les obtient plus nettes et en plus grand nombre. (Voy. les *Traités de physique*.)

conséquent les vibrations produisant la chaleur obscure surpassent de beaucoup en longueur celles qui excitent les actions chimiques. La longueur d'onde de l'extrême rouge visible situé à côté de la raie A de Fraünhofer est, d'après Mossotti[1], 738 millioniémes de millimètres. Pour le milieu du jaune, c'est-à-dire au maximum du pouvoir éclairant, on trouve 553,5, et enfin l'extrême violet près de la raie I correspond à 369. Les nombres précédents fournissent très-sensiblement les limites extrêmes du spectre visible, au moins pour les vues ordinaires. Ils nous montrent que l'onde de l'extrême rouge est double de l'onde de l'extrême violet, la plus grande intensité lumineuse correspond à la moyenne entre ces deux quantités. Ainsi les limites de sensibilité de l'œil sont séparées par un intervalle égal à celui qui, en acoustique, est nommé une octave.

Continuité des ondes lumineuses.

Les espaces obscurs du spectre, observés par Fraünhofer et nommées par lui *raies*, prouvent que la variation de la longueur des ondes parvenant du soleil jusqu'à nous ne suit pas une loi de continuité. Or, avec les puissants spectomètres modernes, on est parvenu à observer uue infinité de raies; donc d'une longueur d'onde à une autre il existe un intervalle mesurable, quoique très-petit. Ces lacunes ne sont pas véritablement causées par un défaut de continuité dans les ondes qui peuvent prendre naissance dans l'éther, mais elles tiennent à d'autres circonstances dont l'étude sera faite plus tard. En effet, elles disparaissent dans le cas des solides simplement incandescents : alors on obtient des spectres tout à fait continus. A ce sujet, on nous permettra une remarque. Quelques auteurs ont voulu trouver les lois des harmonies des couleurs en les déduisant des rapports trouvés entre la longueur des ondes correspondant à ces raies obscures; mais ces conclusions ne reposent pas sur des faits parfaitement établis, et, au lieu de se baser sur ces raies pour établir les combinaisons de couleurs agréables ou désagréables à l'œil, il serait préférable de se fonder sur les longueurs d'ondes propres aux teintes dont l'harmonie est reconnue dans les arts.

Ondes limites caloriques et chimiques.

Si maintenant nous cherchons les limites extrêmes des radiations calorifiques et chimiques, nous les trouvons de beaucoup plus

[1] Mossotti, *des Propriétés des spectres de Fraünhofer*. Pise, 1845, p. 23.

éloignées. Selon Müller, la plus longue des vibrations calorifiques obscures mesurées jusqu'à ces derniers temps est de $0^{mm},00183$, elle est donc triple de celle de la raie D, dont la valeur $= 0^{mm},0006$, et sextuple de l'onde extrême fluorescente, c'est-à-dire de l'ultraviolet fixée à $0^{mm},0003$ par Esselbach. Ainsi les ondes calorifiques sont environ six fois plus longues que les vibrations extrêmes chimiques nommées ondes fluorescentes. Du reste, l'étendue totale du spectre complet n'est pas toujours la même : Stokes, par des méthodes fort délicates, a obtenu à l'aide de la lumière électrique, un spectre chimique dans lequel la partie fluorescente était 6 fois plus longue que la région lumineuse[1].

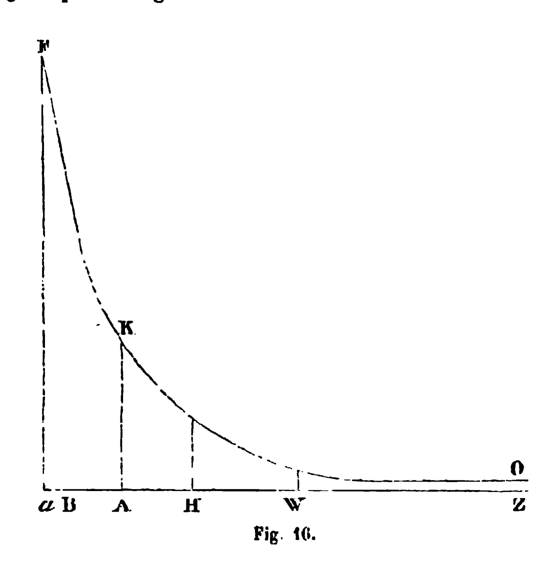


Fig. 16.

La figure 16 montre la loi d'accroissement de la longueur des ondes en allant du violet au dernier rayon calorifique obscur. La courbe FKO par ses ordonnées donne les longueurs approchées relatives aux diverses parties du spectre marquées par les mêmes lettres dans la figure 12. On voit par là la condensation des rayons au côté rouge et la dilatation du violet.

Il convient ici d'établir un parallèle entre l'échelle spectrale et

[1] Müller, B. U. *Arch. sc. physiques*, 1859, vol. IV, p. 364, et *Silliman Journal*, 1863, p. 108.

l'échelle sonore. D'après les physiciens, les sons les plus graves perceptibles correspondent à 31 vibrations par seconde, et les plus aigus à 36,000 vibrations; le rapport entre les extrêmes de la série acoustique est donc de 1 à 1126. Pour les vibrations mesurées de l'éther, le rapport est beaucoup moindre, et, il existe une lacune énorme entre les vibrations mesurées des corps sonores et les agitations moléculaires calorifiques. Mais de ce que nous ne percevons pas certaines ondes, il n'en faut pas conclure qu'elles n'existent point. Ainsi au delà de la limite obscure désignée sur notre figure par la lettre α, il peut y avoir d'autres ondes plus longues, que nous ne pouvons apprécier par nos procédés expérimentaux et qui pourraient réunir les deux séries. La chose paraît même fort probable. En effet, le professeur Garibaldi de Gênes, a trouvé que à 73° centigrades les corps chauds et obscurs émettent des ondes dont le nombre ne dépasserait pas 40 000 000 000 000 dans une seconde. Même en poussant ses recherches ingénieuses avec toute l'habileté possible, M. Kœnig n'a pu mesurer un nombre de vibrations sonores supérieur à 50,000 par seconde et les sons obtenus alors ne sont plus des sons musicaux mais de véritables bruits à cause de leur très-courte durée. Le rapport de l'onde la plus courte acoustique, et la plus longue thermique mesurée serait encore 800 000 000 à 1. Parallèles des ondes sonores et lumineuses.

Les corps vibrant qui rendent ces sons excessivement aigus s'échauffent et finissent par atteindre l'incandescence ; par conséquent leurs molécules sont susceptibles de vibrer dans toute l'étendue comprise entre les limites acoustiques et optiques. Nous sommes donc en droit de conclure que le mouvement oscillatoire des particules matérielles peut s'effectuer avec une lenteur extrême ; comme cela arrive pour les sons musicaux les plus graves, puis s'accélérer jusqu'à présenter cette incroyable vitesse de 946 000 000 000 000 vibrations par seconde qui caractérise l'onde chimique extrême du spectre. Liaison du son à la chaleur.

Avant d'abandonner ce sujet, nous ferons remarquer que les ondes lumineuses nous offrent un étalon de mesure absolu et inaltérable dejà proposé par nous il y a longtemps. La longueur de l'onde du sodium ou de l'hydrogène ou d'un autre corps simple quelconque est toujours identique à elle-même, tant que le métal Étalon de mesure déduit des ondes lumineuses.

conserve sa *nature*. Cette longueur est donc un type de mesure linéaire aussi invariable que la nature des choses. Et un étalon ainsi choisi ne devrait pas être repoussé comme étant trop petit; car le rapport entre la longueur de l'onde sodique et la longueur du mètre est plus grand que celui qui existe entre le mètre et son prototype, c'est-à-dire le quart du méridien terrestre. En effet, l'onde du sodium est six-dix-millionèmes du mètre à très-peu près, (c'est-à-dire $0^{m},000\,0006$) pendant que le mètre n'est qu'un dix-millionième (0,000 0001 du méridien terrestre[1]. Ajoutons que ces mesures d'onde ont été obtenues à l'aide des franges produites par les réticules, lesquelles ont une notable largeur, de sorte que outre la facilité des mesures, on a encore la certitude de pouvoir obtenir toujours des résultats identiques. Mais terminons ici cette petite digression et revenons à notre sujet.

Durée de l'impression optique.

La durée d'une vibration jaune moyenne étant 530 bilionièmes de seconde[2], on saisit facilement comment une onde seule, et même un petit nombre d'ondes, ne peut ébranler le nerf optique. La sensibilité de la rétine, pour être excitée demande une impression suffisamment énergique et durant au moins quelques centièmes de seconde : faible intervalle de temps pendant lequel plusieurs billions d'ondes lumineuses peuvent se produire. Voilà encore une nouvelle preuve en faveur de ce que nous avons dit plus haut pour expliquer : 1° comment l'œil n'est pas sensible à l'action des ondes latérales qui prennent naissance au delà d'un orifice étroit traversé par un faisceau lumineux; 2° comment il se fait que les ondes lumineuses ne paraissent pas se répandre dans tous les sens.

Élasticité de l'éther.

La vitesse de propagation de la lumière dans un milieu varie avec le degré d'élasticité de ce milieu ; par conséquent, la lumière se propageant à raison de 300 000 kilomètres par seconde[3], il en résulte que l'élasticité de l'éther doit être très-considérable. Cette élasticité tient-elle à la constitution de l'éther, qui, selon Huyg-

[1] Selon van der Willingen, l'onde de la raie C = 6565,6 dix-millionièmes de millimètres.

[2] Il faut donc 50 000 000 000 000 pulsations lumineuses pour donner naissance à la couleur qui dans le spectre occupe le milieu du jaune.

[3] Les nouvelles recherches donnent 298 000 kilom.; mais, pour notre but, ces différences sont insensibles.

hens, serait un fluide formé de sphères élastiques, ou bien est-elle un simple effet de la rotation des molécules d'éther? Cette question sera élucidée plus loin. Toujours est-il que l'éther doit être énormément élastique. Le calcul enseigne que, dans un milieu homogène, un ébranlement vibratoire se propage avec une vitesse représentée par la racine carrée du quotient de l'élasticité par la densité $V = \sqrt{\frac{e}{d}}$. Donc, si nous pouvons connaître un des deux termes de ce rapport, nous aurons l'autre ; mais jusqu'à présent il a été impossible de déterminer isolément l'une des quantités e et d. On dit à la vérité que l'éther doit être d'une très-faible densité, car dans les espaces intraplanétaires il n'oppose aucune résistance au mouvement des corps célestes. Cette proposition est une pétition de principe : on suppose en effet l'éther destiné exclusivement à propager la lumière ; or rien ne prouve qu'il ne puisse être lui-même principe de la gravité, et si cela était évidemment il pourrait présenter une très-grande densité sans apporter aucune perturbation dans le système planétaire. D'un autre côté, en admettant avec quelques-uns la très-faible densité de l'éther, il est difficile de comprendre comment un milieu extrêmement rare (c'est-à-dire dans lequel des atomes très-petits sont séparés par des distances relativement très-grandes) peut propager un mouvement avec une énorme vitesse, et, de plus, sous forme d'ondes tellement courtes, que 2 000 au moins sont nécessaires pour représenter une longueur de 1 millimètre.

Distances de ses atomes et sa densité.

Cauchy, en soumettant à une analyse très-rigoureuse certaines observations d'Arago, arriva à conclure que la distance entre deux atomes d'éther devait être sensiblement de $\frac{1}{200}$ de l'onde rouge[1]. D'autres physiciens ont émis une hypothèse tout opposée. Pour eux, l'éther est un milieu continu, supposition inadmissible aujourd'hui, car les phénomènes de la polarisation de la lumière montrent que l'éther est constitué par des atomes séparés. Jusqu'à présent, il nous est donc impossible de chercher un rapport entre la densité de l'éther et celle de la matière pondérable, parce que les termes de comparaison nous manquent complétement. Rappelons-nous que la *densité* d'une substance est toujours

[1] Cauchy, *Exercices d'analyse et de phys. math.*, t. I, p. 326.

relative, et nous n'avons pas moyen de comparer l'éther à la matière pondérable : il nous faudrait, à la rigueur, connaître leur structure, car la masse d'éther est inappréciable à nos moyens.

Parallèle entre le son et la lumière.

Assurément l'éther est une *matière* susceptible d'être mise en mouvement par la vibration des particules appartenant aux corps en ignition, de la même manière que l'air est mis en vibration par un instrument de musique; si bien que l'on peut établir de précieux rapprochements entre ces deux ordres de phénomènes. Ainsi : 1° notre oreille est le seul organe capable de percevoir comme *son* l'ondulation aérienne, tandis qu'un solide animé de vibration, étant mis en contact avec une partie quelconque de notre corps, nous fait percevoir le frémissement de ses chocs; de même l'œil a seul la faculté de sentir le mouvement de l'éther comme *lumière*, et tous nos membres peuvent percevoir la vibration de la matière sous forme de chaleur; 2° le son et le frémissement vibratoire d'un corps reconnaissent tous deux pour origine des mouvements de même nature, mais l'un se passe dans l'air et l'autre dans un corps solide ; de même la lumière et le calorique dit statique ou de température sont des mouvements similaires : le premier se produit dans l'éther, et le second dans un corps pesant ; 3° parfois les vibrations de l'air ne produisent aucune impression sur l'oreille, certains sons nous échappent, parce qu'ils sont trop graves, les autres à cause de leur trop grande acuité ; l'œil se trouve dans les mêmes conditions relativement aux vibrations extrêmes des spectres calorifique et chimique; 4° un corps sonore, par l'intermédiaire de l'air, communique son mouvement aux instruments accordés à l'unisson, quand même ils seraient à une assez grande distance; de son côté, un corps chaud échauffe un autre placé à distance, car, grâce à l'éther, un échange s'établit entre eux par simple rayonnement. Ces principes une fois posés, il devient inutile de chercher la lumière sans chaleur, et Melloni, à la fin de sa trop courte carrière scientifique, était arrivé à cette même conclusion ; 5° l'amplitude des vibrations dans les corps sonores est extrêmement petite, eu égard à la longueur des ondes aériennes ; la même chose doit arriver mais à un degré encore plus élevé pour les vibrations lumineuses. Grove, en faisant réfléchir un rayon solaire sur une petite lame de platine

formant miroir, n'a pu constater aucune différence dans le rayon réfléchi successivement par le métal d'abord froid, puis porté à l'incandescence à l'aide d'un courant électrique.

Tout aussi bien que les rayons calorifiques, les rayons chimiques présentent des phénomènes d'interférence ; par suite, on doit les regarder comme un genre de mouvement particulier, et les actions chimiques de la lumière se classent parmi les actions mécaniques au même titre que les effets calorifiques. La question fameuse : « Que devient la lumière lorsqu'elle s'éteint? » se transforme en cette autre : « Que devient le mouvement lorsqu'il cesse d'être appréciable à nos sens? » Ainsi, la théorie dynamique ramène à de simples problèmes de transformation de mouvement la théorie de tous les phénomènes qui présentaient des difficultés considérables dans le système de l'émission ; car, pour en donner une explication rationnelle, on était forcé de supposer un anéantissement de la matière lumineuse. Question fameuse.

Les indications précédentes sont suffisantes pour le moment ; nous les développerons plus tard, et nous montrerons alors comment l'optique fournit les preuves les plus complètes à l'appui de la théorie dynamique de la chaleur.

Il sera bon maintenant de faire quelques réflexions générales sur l'éther, car encore à notre époque, un grand nombre de personnes acceptent l'hypothèse de l'éther avec la plus grande répugnance. Considérations sur l'éther.

Plusieurs physiciens modernes, reconnaissant que l'émission newtonienne est impossible à soutenir plus longtemps, ont supposé que la lumière se propageait simplement par l'intermédiaire de la matière pondérable[1]. S'il s'agit de la transmission de la lumière par les solides diaphanes, la question ne saurait être tranchée ici, car dans ces substances l'éther a des rapports tellement intimes avec la matière pesante, qu'il est difficile de décider si lui seul agit dans ces conditions. Laissant la question pendante pour le moment, nous dirons, que l'éther peut pénétrer tous les corps à la façon des molécules lumineuses imaginées par les newtoniens, ou bien encore à la façon des radiations admises par d'autres sa-

[1] Exemple, le célèbre M. Grove cité par nous en maintes circonstances, et Euler lui-même.

vants; et, négligeant pour le moment le côté général de la question, nous nous bornerons à l'examen de la propagation de la lumière dans les espaces planétaires.

L'éther n'est pas la diffusion des atmosphères planétaires.

On a supposé d'abord ces espaces occupés par une matière pondérable proprement dite, avec toutes les qualités qui lui sont propres, et on a supposé que l'éther consistait dans une sorte d'extension des atmosphères planétaires. Cette hypothèse est inexacte, nous le déclarons sans hésiter. Il n'existe aucune preuve de cette diffusion indéfinie des atmosphères, et l'admettre serait renverser d'un seul coup toute la mécanique céleste. Bien plus, il n'est pas possible de regarder cette matière comme extrêmement raréfiée, car alors comment expliquer son élasticité considérable et la rapidité avec laquelle elle propage la lumière? En effet, d'après la loi de Mariotte (on doit admettre cette loi pour un gaz aussi raréfié), l'élasticité étant proportionnelle à la densité, la vitesse de propagation deviendrait celle que nous présentent les corps pesants, c'est-à-dire infiniment moindre que celle de la lumière. Mais si l'on entend par continuation d'atmosphère une expansion de leur matière constitutive, raréfiée et placée en état de répulsion absolue ou d'atténuation, c'est-à-dire formée par les atomes élémentaires, alors la question change d'aspect, et la discussion roule plutôt sur les mots que sur le fond, comme nous l'avons dit dans le livre précédent.

Opinions opposées sur sa constitution.

Il est vraiment curieux de voir comment d'un côté certains physiciens cherchent à tout rapporter à l'action de l'éther, tandis que d'autres regardent cet agent comme un jeu de l'esprit dont on peut se passer complétement pour expliquer la constitution des corps. A entendre ces derniers, tout se réduit à démontrer que chaleur et électricité sont un simple mouvement de la matière pondérable, et que l'on peut se dispenser d'admettre un milieu impondérable servant à la propagation de la lumière. Nous avons suivi rigoureusement tous leurs raisonnements, et ils ne nous ont pas convaincus. Aussi regardons-nous comme indispensable d'admettre l'existence de l'éther.

L'éther réclamé par les phénomènes électriques.

Nous avons bien volontiers laissé de côté le fluide calorifique, et nous avouons qu'un grand nombre de phénomènes électriques s'expliquent par le seul mouvement de la matière pondérable;

mais il y a aussi dans cette dernière classe de phénomènes des faits très-nombreux pour lesquels une explication de ce genre est inadmissible ; et si l'on veut en rendre un compte exact, il faut ou supposer des actions s'exerçant à distance sans aucun intermédiaire, chose parfaitement absurde, ou imaginer ces forces dont la nature nous est complétement inconnue, et que dès lors nous cherchons à exclure du domaine de la physique. Tels sont les phénomènes électro-dynamiques et magnétiques, qui journellement, et dans des circonstances très-variées, se manifestent au sein d'espaces complétement vides de matière pesante.

L'éther n'est pas contraire aux principes de mécanique.

Admettre un certain fluide comme cause des phénomènes physiques, ce n'est pas repousser les explications des faits, basées sur les théories mécaniques. A-t-on jamais dit qu'il niait les principes du mouvement, celui qui expliquait l'ascension de l'eau dans les pompes par un jeu de la pression atmosphérique, ou bien encore le transport du son jusqu'à l'oreille par le moyen de l'air ? En raisonnant ainsi, on ne peut certes pas être accusé de se livrer aux fantaisies de l'imagination. Or toute une classe de faits sont inexplicables sans l'hypothèse d'un milieu universel, et un grand nombre d'autres phénomènes deviennent, grâce à elle, d'une intelligence très-facile ; donc, nous pouvons rationnellement accepter cette hypothèse ; en cela nous suivons la méthode des sciences physiques, c'est-à-dire que nous démontrons les principes *a posteriori* et non *a priori*.

La répugnance que l'on éprouve à admettre un milieu, étendu entre nous et les astres, nous semble être une conséquence involontaire de notre habitude de nier l'existence de tout ce qui n'agit point sur nos sens, et spécialement sur la vue ou le toucher ; mais l'observation même la plus superficielle ne tarde pas à nous montrer le peu de valeur d'un critérium exclusivement fondé sur nos sensations ; nous trouvons même ici un exemple à l'appui de ce dire.

L'éther peut servir à expliquer la gravité.

Newton, et certes il était un zélé partisan des forces abstraites, n'hésitait pas à déclarer que la gravité pouvait résulter de l'action de quelque milieu interposé[1] ; bien plus, il déclare

[1] « Quam ego, attractionem appello fieri sane potest ut ea efficiatur impulsu vel alio modo nobis ignoto optice. » (Newton, *Optique*, q. XXIII.)

que, sans ce milieu, on serait conduit à admettre de la part des corps une action à distance, conséquence radicalement absurde. « On ne peut comprendre, écrit-il dans sa troisième lettre à Bentley, comment une matière brute et inanimée pourrait, sans le secours d'un agent non matériel, produire des modifications dans un autre corps, alors qu'elle ne serait point en contact avec ce corps (et cependant les choses se passeraient de la sorte si, admettant les idées d'Épicure, on regardait la gravité comme une propriété inhérente et essentielle)... Supposer que la gravité soit une qualité innée, essentielle, inhérente, à la matière, de telle sorte qu'un corps puisse exercer son action sur un autre plus ou moins éloigné, sans l'interposition d'aucune autre substance établissant une communication quelconque entre eux, me paraît une chose tellement absurde, qu'elle ne peut arrêter un seul instant quiconque a l'expérience de la philosophie. La gravité doit tirer son origine d'un agent dont l'action est continue et soumise à des lois déterminées ; mais cet agent est-il matériel ou immatériel? Voilà une question que dans tous mes ouvrages j'ai livrée à la méditation des lecteurs[1]. »

L'éther est matériel.

Ces dernières paroles de Newton ont été pour quelques-uns l'origine d'une idée fausse ; ils crurent que l'éther était quelque chose d'immatériel, parce qu'il était impondérable. On a fait ici confusion entre deux propriétés très-distinctes, savoir : l'inertie et la gravité ; la seconde n'est pas, comme la première, une qualité essentielle de la matière. On peut concevoir une matière non pesante, mais toute matière doit être inerte, c'est-à-dire qu'elle exige une force pour être mise en mouvement. D'après cela et d'après l'ensemble des phénomènes connus, l'éther pourrait bien être la cause de la gravité. Ce fluide universel présente certainement une constitution différente de celle des gaz ou des autres corps connus de nous : par suite sa nature ne peut nous être révélée par les phénomènes étudiés jusqu'ici ; mais les recherches que nous analyserons plus loin fourniront de précieuses indications sur ce point.

[1] Nous remarquerons cependant que dans la même lettre il dit évidemment que cet agent est matériel (trois lignes plus loin). Cette lettre a été traduite en italien par E^{me} de Luca in *Giornale Arcadico*.

On peut admettre sans difficulté que l'éther existe dans l'intérieur de tous les corps; on sait en effet combien sont poreuses les substances même les plus compactes en apparence; du reste, on doit les admettre comme telles pour expliquer le passage de la lumière à travers leur épaisseur, quel que soit le système adopté. Mais il faut bien s'entendre sur le mot *porosité;* suivant que l'on adopte l'un ou l'autre des deux systèmes, cette expression n'a pas la même valeur, car pour les partisans de l'émission, les pores devront être rectilignes et dirigés dans tous les sens, disposition presque impossible à comprendre, tandis que, dans la nouvelle théorie, on peut leur conserver la disposition qu'on leur attribue ordinairement, car rien n'empêche les ondes lumineuses de contourner les molécules [1].

Il existe à l'intérieur des corps.

Les physiciens qui, repoussant l'hypothèse de l'éther, admettent une raréfaction de la matière, ont émis cette opinion que la lumière pourrait bien s'expliquer par une émanation périodique et alternative de cette espèce de matière raréfiée, et ils espèrent ainsi concilier les deux systèmes. Mais, à notre avis, une semblable théorie ne peut s'appliquer à tous les cas observés en optique, et particulièrement à la polarisation; de plus, elle est au moins inutile. En effet, si cette émanation est continue et dure depuis l'origine des choses, l'espace doit être actuellement rempli de ces *infiniment petits*, de ces *monades*, pour employer une expression célèbre, et leur ensemble doit équivaloir à un milieu *physiquement* continu; de cette façon, les espaces interplanétaires seraient occupés par une matière formée d'éléments en état de répulsion, et cela revient à admettre un fluide universel soustrait à l'influence de la gravité. On peut appliquer à ce fluide les vers consacrés par Lucrèce à l'air atmosphérique [2] :

Hypothèse de la matière raréfiée.

Semper enim quodcumque, fluit de rebus, id omne
Aeris in magnum fertur mare; qui nisi contra
Corpora retribuat rebus recreetque fluenteis
Omnia jam resoluta forent et in aere versa.

Cette matière très-atténuée, doit, par sa pression, agir sur

Cette hypothèse au fond coïnciderait avec celle de l'éther.

[1] Cette remarque est de Leop. Nobili, *Nuovo Tratt. di ottica*. Milano, 1820.
[2] Livre V, v. 276.

tout, et produire dès lors les effets attribués par d'autres à l'action de l'éther. Enfin, si l'espace est rempli par cette matière, comment pourra-t-elle ne point participer aux mouvements qui s'y produisent? comment pourra-t-elle ne pas être ébranlée par les vibrations des corps chauds et des corps lumineux? Et si cette communication de mouvement s'établit, qui pourrait distinguer cette matière de l'éther[1]?

Ajoutons encore que les défenseurs de cette doctrine sont forcés d'admettre à chaque instant des forces tantôt attractives, tantôt répulsives, au moins pour expliquer la formation des molécules. L'existence de l'éther une fois reconnue, toutes ces hypothèses deviennent inutiles.

Après la discussion à laquelle nous venons de nous livrer, on reconnaît évidemment, je pense, combien sont peu éloignées les unes des autres toutes ces opinions qui, au premier aspect, semblent diamétralement opposées, et surtout on peut voir combien sont peu raisonnables les personnes qui ont essayé de faire tomber en défaveur et même de couvrir de ridicule le système basé sur l'existence de l'éther. Assurément l'hypothèse d'un milieu universel a fait faire un pas immense à la théorie de l'unité des forces physiques en démontrant que de nombreux phénomènes, attribués à l'action de fluides divers, étaient de simples modes du mouvement de la matière pesante; néanmoins il ne serait pas logique de vouloir envisager toute la physique sous ce point de vue, et dans l'analyse des faits que nous développerons plus tard, nous serons ramenés à l'hypothèse de l'éther par des considérations d'un ordre tout différent, tirées de l'étude de l'électricité.

L'éther n'est pas une force.

Un éminent physicien a écrit que l'idée d'éther ou de fluide n'est pas plus claire que celle de *force*[2] : tout au contraire, nous

[1] *Le Sage* fut un des grands promoteurs de la théorie de la gravité produite par les corpuscules *extra-mondains* qui, doués d'une vitesse énorme, se croisaient en tous sens. Lesage avait lui-même emprunté de Redecker cette théorie des corpuscules. Tant il est vrai qu'il est nécessaire d'exclure ce vide et ces actions à distance, que nous voyons aujourd'hui rappelés à la vie par des hommes du reste très-habiles et dont les travaux pourraient, dans une autre direction, être plus utiles à la science. Cela nous a déterminé à discuter ces idées un peu au long, bien qu'aujourd'hui la nécessité de le faire se fasse moins sentir.

[2] Grove, *Corrél. des forces physiques*, p. 127.

regardons comme inconcevable l'idée de force introduite dans l'explication des phénomènes naturels, si on ne l'envisage pas comme une propriété inhérente à un certain support; mais un fluide est parfaitement concevable, quand même on le suppose intangible et impondérable (l'air n'a-t-il pas été considéré comme tel pendant longtemps?) : de plus, si ce fluide est en mouvement, sa masse à elle seule par sa vitesse devient déjà une *force*. Nous allons montrer comment notre hypothèse permet d'aborder avec facilité la théorie des phénomènes physiques, et nous espérons prouver que l'éther, admis d'abord pour rendre compte des manifestations lumineuses, doit être admis pour l'intelligence de plusieurs autres résultats d'observations.

Nous chercherons à reconnaître les propriétés de cet agent universel en recourant exclusivement à l'expérience et à l'analyse successive des faits ; nous commencerons donc par discuter ceux qui établissent la matérialité et l'inertie de l'éther, puis nous examinerons comment on a pu obtenir des indications sur la constitution et le mode d'action de ce fluide.

CHAPITRE IV

MATÉRIALITÉ DE L'ÉTHER : ÉCHANGES DE MOUVEMENT ENTRE LE FLUIDE ET LA MATIÈRE PONDÉRABLE : POUVOIR ABSORBANT DES CORPS POUR LA LUMIÈRE.

Nous avons jusqu'à présent regardé l'éther comme un fluide élastique, nous réservant de chercher plus tard quelle était la nature de cette élasticité. De plus, nous avons reconnu qu'il se comportait comme une matière inerte; aussi, à notre avis, l'expression *fluide immatériel*, appliquée à l'éther, est-elle défectueuse, quand même on l'emploierait seulement pour montrer qu'il est d'une nature contraire à celle de la matière pesante; cette locution prêtera toujours à l'équivoque. L'éther n'est pas immatériel.

L'éther pénétrant tous les corps, on ne peut constater son poids, car il arrive pour le fluide ce qui se présenta pour l'air, dont la pondérabilité ne fut pas soupçonnée jusqu'à ce que l'on Son impondérabilité.

eut imaginé des appareils propres à le condenser et à le raréfier ; nous trouvant ainsi dans l'impossibilité de reconnaître la pondérabilité de l'éther, si nous voulons prouver sa matérialité, il nous reste à démontrer son inertie, c'est-à-dire sa résistance au mouvement. Quelques savants ont songé à constater cette résistance, en déterminant l'effet qu'elle devait exercer sur le cours des astres. Ainsi, ils attribuaient une grande importance aux perturbations éprouvées par certaines comètes[1]. Ce mode de démonstration est sans valeur. En effet, il n'est pas complétement établi que les perturbations cométaires soient produites par la résistance d'un milieu, et dans le cas où telle en serait la cause, le milieu résistant pourrait être tout autre que l'éther lumineux ; par exemple, ce pourrait être la substance qui forme la lumière zodiacale, ou des groupes de bolides[2], etc. De plus, aujourd'hui que l'on a découvert un nombre considérable de petites planètes entre Mars et Jupiter (133 jusqu'à ce jour[3]), est-on assuré que certaines d'entre elles ne puissent se trouver sur le chemin d'une comète et influencer son mouvement à la manière d'un milieu résistant ? Ainsi, tout est incertitude de ce côté. Bien plus, il n'est pas rationnel de croire à une résistance opposée par l'éther au mouvement des corps graves, car cette matière, selon toute probabilité, est la cause efficiente de la gravité ; par conséquent, les mouvements des corps célestes ne sauraient être troublés par elle. L'éther étant admis, il ne s'ensuit pas nécessairement qu'on doive donner à la gravité pour origine les trop fameux tourbillons cartésiens : hypothèse détruite à jamais par l'observation des orbites paraboliques des comètes. Pas davantage il n'est besoin de la supposer produite directement par les vibrations calorifiques ou lumineuses, car on peut très-bien concevoir un tout autre mode de développement, sur lequel nous nous entendrons plus tard.

Son inertie.

Résistance douteuse.

Inertie de l'éther.

A notre avis, les actions moléculaires, beaucoup mieux que les phénomènes astronomiques, peuvent nous donner des preuves en faveur de l'inertie de l'éther, et, par suite, de sa matérialité.

1° Un corps chaud placé dans le vide se refroidit par rayonne-

[1] Parmi les plus fameuses, on peut citer celle de Enlke.
[2] Voy. Faye, *Comptes rendus*, 1861, et Plana; *Mem. acad. di Torino*, vol. XXI.
[3] 8 septembre 1873.

ment, c'est-à-dire sans aucune communication avec les autres corps pesants par contact immédiat. Alors le mouvement se propage aux corps pondérables en se communiquant d'abord à la substance impondérable ambiante. En effet, on ne peut expliquer le refroidissement par un anéantissement de mouvement dans le corps rayonnant, puisqu'une partie de la vibration calorifique se transmet aux objets éloignés; nous disons se transmet, sinon il faudrait supposer une création de mouvement dans ces objets sous l'influence de la seule présence des corps chauds. Dans ce phénomène, nous voyons la force vive appartenant à une quantité déterminée de matière sensible abandonner celle-ci et se communiquer à la matière impondérable; donc, cette dernière doit avoir une masse définie inappréciable aux balances, il est vrai, mais qui n'en est pas moins parfaitement réelle.

Rayonnement solaire.

Le soleil est pour nous le foyer le plus intense de radiation calorifique, sa puissance de rayonnement devrait donc diminuer avec les années si ses pertes journalières n'étaient pas incessamment compensées. Sa température est énorme, Waterston en estime la valeur potentielle à 6 700 000 degrés centigrades : d'après cet auteur, en tenant compte des pertes qu'il éprouve continuellement, elle devrait diminuer de 3 degrés par année. D'après les données fournies par Pouillet, on trouve que chaque mètre carré de la surface du soleil émet 13 610 calories par seconde, quantité de chaleur équivalente à 3 791 840 kilogrammètres, soit 77 232 chevaux-vapeur. Cette immense force est employée à tenir l'éther environnant en mouvement.

Échange de mouvement entre la matière et l'éther.

Réciproquement, le mouvement de l'éther peut se communiquer à la matière pesante ; ainsi, la lumière, qui s'éteint en rencontrant la surface d'un corps, se transforme en chaleur, de sorte que les corps noirs, et en général ceux dont le pouvoir réflecteur est très-faible, s'échauffent plus facilement que les autres. La quantité de chaleur absorbée est ordinairement proportionnelle à la lumière éteinte. Mais ce rapport peut changer complétement avec la nature des radiations, d'une part, et les propriétés moléculaires des corps, de l'autre. Ainsi, un cristal d'alun parfaitement transparent absorbe la chaleur presque totalement, et, au contraire, un verre noir et opaque ou un quartz enfumé à peine

translucide laisse passer les rayons calorifiques avec la plus grande facilité. Ces phénomènes, analogues à ceux présentés par les couleurs, nous montrent qu'il existe des rayons calorifiques de différentes qualités comme des rayons lumineux de différentes couleurs, de sorte que l'on doit, avec Melloni, admettre la *thermochrose*[1].

Prouvée par le spectroscope.

Pour mieux mettre en relief les échanges de mouvement qui peuvent s'accomplir entre l'éther et la matière pesante, il est bon



$\frac{1}{5}$

Fig. 17.

de rappeler sommairement les découvertes récentes faites à l'aide du spectroscope[2]. En examinant au moyen de cet instrument un

[1] Thermochrose : θέρμη, chaleur ; χρώζω, colorer.

[2] Le spectroscope (fig. 14) est formé par un ou plusieurs prismes très-purs que l'on fait traverser par un faisceau de lumière parallèle. Le parallélisme des rayons s'obtient soit en introduisant le faisceau par une ouverture très-étroite située à une assez grande distance des prismes, soit à l'aide d'un objectif achromatique placé à une moindre distance dans le tube C. Le spectre obtenu est observé directement à l'œil nu, ou mieux encore avec une lunette B. Pour permettre la mesure de la distance des raies, l'image du spectre se projette sur une échelle micrométrique disposée dans le tube D qui est aussi un collimateur portant l'échelle éclairée par une lampe et dont l'image se réfléchit sur une surface du prisme dans l'intérieur de la lunette B.

corps solide incandescent, on obtient un spectre continu sans aucune des raies transversales qui existent dans le spectre solaire; si on élève alors la température à un point suffisant pour déterminer la combustion de quelques-uns des éléments du corps, aussitôt on voit apparaître des raies lumineuses diversement colorées, suivant la nature de la substance en ignition. Ces raies sont séparées par des espaces obscurs; quelquefois elles sont fort peu nombreuses, il peut même ne s'en présenter qu'une seule, mais constamment le spectre est discontinu et d'un aspect caractéristique pour chacun des corps simples. Ordinairement, les spectres obtenus dans ces circonstances sont mixtes, c'est-à-dire que les raies brillantes se détachent sur un fond lumineux, car la substance qui entre en combustion est toujours mêlée à quelques parcelles de matière étrangère portées simplement à l'incandescence[1]. La production des raies s'obtient avec toute la netteté désirable lorsque la combustion s'opère au sein de la lumière électrique produite par le courant d'une pile[2]. L'arc lumineux jaillissant entre les charbons de la lampe électrique donne des raies ridées, pendant que les charbons eux-mêmes ne donnent qu'un spectre continu. Pour plus de facilité, on peut employer les courants d'induction, mais les lignes ne sont ni aussi pures, ni aussi nettes. Ces vibrations se manifestent avec une telle précision, qu'elles ont permis la découverte de nouveaux corps simples dont l'existence a été révélée par l'apparition de raies lumineuses qui n'appartenaient à aucun des éléments connus auparavant. Faisons remarquer, à ce propos, que le genre de la vibration dépend non-seulement de la nature de la substance, mais encore de la température à laquelle cette substance est portée. Ainsi, le thallium, chauffé à un degré suffisant pour brûler dans l'air, présente une raie verte, et chauffé plus fortement (Miller), ou introduit dans l'arc voltaïque (Grove), il donne d'autres raies; de même pour le sodium et quelques autres corps. Les raies d'une

[1] Dans la flamme des lampes à huile, dans celle du gaz d'éclairage, les raies sont visibles seulement dans la partie inférieure violette, zone dans laquelle la combustion est très-active et qui est formée par l'oxyde de carbone; le reste de la flamme est constitué simplement par du charbon incandescent. Au contraire, la flamme du bois et du papier produit une raie jaune brillante, qui est celle du sodium; les autres parties du spectre appartiennent au charbon incandescent.

[2] Voy. le journal intitulé : *Nuovo Cimento del Matteucci*, anno 1. 1852.

substance varient encore suivant son degré de cohésion et sa densité. Ainsi, le spectre de la lumière électrique peut être continu ou présenter des raies si les charbons employés sont plus ou faciles à désagréger (Daniel), et, d'après les expériences de Robinson, lorsque dans la flamme d'une substance on introduit quelques parcelles d'une autre, on obtient des raies n'appartenant à aucune des deux.

Substances à spectres multiples.

Les recherches de Plüker ont mis hors de doute les faits suivants : 1° Quelques substances élémentaires peuvent donner deux spectres dont les lignes obscures ne présentent entre elles aucune relation. Ainsi l'azote traversé par de faibles décharges nous offre un spectre magnifique, formé de nombreuses larges raies ou zones principales, présentant toutes des bandes cannelées très-nombreuses, et qui se répandent sur toute l'étendue du spectre; seulement les zones comprises entre le rouge et le vert sont les plus larges, et celles placées au delà du vert sont les plus étroites ; 2° mais si l'on augmente la puissance de la décharge en faisant usage d'une machine plus énergique et munie d'un condensateur, d'une bouteille de Leyde par exemple, on obtient un spectre, formé exclusivement de lignes brillantes sur un fond obscur, le passage d'un spectre à l'autre se fait avec une discontinuité parfaitement marquée. Le soufre et le carbone fournissent des résultats semblables, et avec ce dernier suivant la température, de nouveaux groupes de raies s'ajoutent aux premiers. Le spectre type de la vapeur de carbone paraît être celui du cyanogène brûlant dans l'oxygène [1].

Or l'interposition d'une bouteille de Leyde dans le circuit électrique a pour résultat un échauffement considérable du gaz, et tel que la température atteint un degré difficile à produire par un autre moyen ; les phénomènes observés sont donc un effet de la très-grande élévation de température, soit sur le gaz élémentaire directement, soit sur les combinaisons qui se trouvent mêlées au

[1] Shuster a cru que les spectres cannelés des gaz étaient dus à quelque oxyde de l'azote, car, en général. les oxydes donnent des spectres cannelés. Mais, après les nouvelles recherches de différents savants, cette opinion n'a pas été acceptée par tous. Il faut avouer que cette question est très-difficile à résoudre. Nous avons obtenu avec le même gaz et le même tube, deux et même trois spectres différents, en regardant dans les différentes sections. Cela prouve que tout dépend de la température du gaz d'une manière ou de l'autre.

gaz élémentaire. Ces puissantes décharges ne modifient pas la structure intérieure du gaz ; la preuve en est que l'on peut plusieurs fois de suite avec un même tube obtenir l'un ou l'autre spectre. Il se manifeste donc alors une modification dans les vibrations moléculaires analogues aux changements allotropiques. Sous l'influence des étincelles électriques un grand nombres de gaz composés se décomposent et restent décomposés, dans certains autres les éléments se séparent seulement au moment du passage de l'étincelle et se recombinent aussitôt après. En présence de ces faits, on est tenté de croire que les raies des corps qui donnent deux spectres sont dues à une dissociation réelle des gaz, lesquels ou ne seraient pas des corps simples dans le véritable sens du mot ou contiendraient des oxydes plus excitables que le gaz élémentaire lui-même. Cette dissociation se maintient seulement pendant que la température reste très-élevée ; nous avons déjà vu dans notre chapitre sur la dissociation, semblable chose arriver à la vapeur d'eau.

Spectre de l'hydrogène.

L'hydrogène, selon Plüker, ferait exception, son spectre devenant continu seulement aux températures élevées obtenues par de fortes décharges. Mais ce fait présente encore quelque incertitude, car avec un gaz à faible tension sans employer ni fente ni lunette, à l'aide d'un simple prisme on observe un spectre qui approche beaucoup d'être continu, tandis que, en se servant d'un appareil muni de tous ses accessoires, on ne voit que trois raies. Dans les études spectroscopiques, on n'a pas encore parfaitement déterminé le degré d'influence que peut avoir *l'intensité* de la lumière des diverses raies, la mesure photométrique n'en ayant pas encore été faite ; aussi est-il permis de conserver quelques doutes sur certains résultats partiels. Néanmoins il reste constant que ces raies se forment exclusivement lorsqu'on opère sur les corps réduits à l'état de vapeur ; résultat conforme à cette proposition énoncée ailleurs : au commencement de toute combinaison chimique, avons-nous dit, la matière se constitue dans un état de volatilisation spéciale. En outre, ces faits nous portent à croire que les corps regardés comme simples jusqu'à aujourd'hui éprouvent probablement une dissociation temporaire durant le passage de puissantes étincelles.

Spectre solaire.

La richesse du spectre solaire en raies lumineuses est telle, qu'à la simple vue il nous paraît continu; mais, en l'examinant avec le spectroscope, on a reconnu que cette continuité apparente n'existe réellement dans aucune de ses parties.

Les raies lumineuses, très-abondantes, sont dues à l'immense variété des matières incandescentes qui forment le soleil et à sa prodigieuse température, à laquelle tous les gaz donneraient un spectre continu; les raies obscures résultent de l'absorption de certains rayons par l'atmosphère solaire. Nous démontrerons ces propositions un peu plus loin.

Voyons maintenant comment ces faits peuvent nous éclairer sur la nature de l'éther et des corps pondérables.

Conséquences des faits précédents.

Les observations précédentes conduisent à admettre dans les corps deux états lumineux : un de simple incandescence et l'autre de volatilisation ou d'activité chimique[1]. Empruntant une comparaison à l'acoustique, nous dirons que le premier état est analogue à celui d'un corps lorsqu'il donne naissance à un bruit, c'est-à-dire à des ondes sonores confuses, parce qu'elles coexistent à tous les degrés possibles de longueur; les corps présentant le second état peuvent être rapprochés de ceux qui rendent des sons musicaux, des cordes vibrantes, par exemple. Supposons un corps animé d'un mouvement vibratoire moléculaire assez rapide pour le rendre lumineux, mais insuffisant pour déterminer sa combustion ou sa volatilisation, en un mot, les liens moléculaires résistant encore, alors les ondes présentent toutes les longueurs possibles, à l'exception des plus courtes, qui, par contre, peuvent provoquer les actions chimiques. Imaginons maintenant que l'intensité du mouvement intérieur augmente à un point tel, qu'il en résulte la vaporisation des corps et que les molécules prennent l'état de répulsion réciproque qui ordinairement accompagne

[1] Dans ces derniers temps quelques savants ont contesté l'énorme température du soleil donnée par Waterston et adoptée par nous. Mais ces savants ne nous paraissent pas avoir tenu suffisamment compte de la distinction faite plus haut. Nous pouvons mesurer les températures qui sont bornées à l'incandescence, mais nous n'avons aucune idée nette de celles qui constituent l'état des molécules libres dans l'activité chimique, comme nous le produisons, par exemple, à l'aide des courants électriques. Or, dans le soleil, ce sont seulement les secondes qui s'y trouvent. La température de la fusion du platine même ne réussit pas à produire les raies du métal calcium, mais seulement celles de son oxyde, la chaux. Et cependant ce métal est en vapeur dans la couche plus froide extérieure du soleil.

ou précède les combinaisons chimiques entre les substances élémentaires; aussitôt le mouvement vibratoire se régularise, prend un rhythme spécial et caractéristique de la substance elle-même. Or il est évident que, pour obtenir ces phénomènes ultimes, il faut absolument placer la matière dans cet état dit répulsif qu'elle présente au moment où elle se vaporise, ou bien lorsqu'elle prend part à une réaction chimique ; alors seulement les molécules, dégagées de tout lien, isolées, pour ainsi dire, vibrent en complète liberté, chacune suivant un rhythme spécial dépendant de sa masse et de son degré d'élasticité.

Vibrations des molécules élémentaires

Toute molécule libre paraît avoir une vibration qui lui est propre, déterminée par sa masse et sa force vive, c'est-à-dire par sa température ; peut-être cette vibration se subdivise en plusieurs autres par l'effet des variations de température. Toujours est-il qu'elle ne se présente sous sa forme vraie qne si la molécule est absolument libre. Il en est de même en acoustique : un corps rend-il des sons musicaux très-purs, que l'on gêne sa vibration, et aussitôt il fait entendre des bruits discordants. Aussi avons-nous dit que d'après les observations spectrales dans les solides, certains groupes moléculaires très-probablement se désagrégent et passent à l'état élastique. La température énorme qui accompagne l'étincelle électrique est celle qui agit le plus puissamment et le plus facilement pour produire cette volatilisation moléculaire. A quelles lois obéissent ces mouvements vibratoires? on l'ignore complétement, et toute hypothèse à ce sujet serait peu fondée ; mais il est permis d'affirmer que la nature des oscillations est étroitement liée à la masse et à la force vive des molécules.

Voyons maintenant comment l'analyse spectroscopique nous fournit un moyen très-précieux de reconnaître les échanges réciproques de mouvement entre l'éther et la matière pesante.

Pouvoir absorbant des vapeurs.

Un corps incandescent examiné au spectroscope donne, comme nous le savons, un spectre continu ; si l'on place entre ce corps et l'instrument une auge de verre à faces parallèles remplie de vapeurs d'iode ou de vapeurs nitreuses, aussitôt apparaissent un grand nombre de raies obscures tout à fait semblables à celles du spectre solaire. Dans cette expérience, on voit la vapeur interpo-

sée absorber manifestement certaines ondes et en laisser passer d'autres très-peu différentes des premières. Dans l'absorption des ondes lumineuses, les vapeurs ne se comportent pas précisément comme les milieux solides colorés, car elles exercent leur action sur des ondes comprises dans des limites parfaitement distinctes, tandis que pour les solides les zones d'absorption sont plus étendues, et leurs limites sont moins nettement déterminées, mais au fond les deux phénomènes reconnaissent une même origine. En traversant une couche épaisse de certaines vapeurs métalliques (sodium, thallium, etc.), les raies deviennent diffuses et se transforment en bandes estompées, s'étendant à grande distance. Cela réussit très-bien en mettant ces métaux dans la lumière électrique.

Renversement du spectre.

Cette propriété absorbante est plus ou moins développée dans tous les corps amenés à l'état de vapeur, qu'ils soient à une température suffisante pour les rendre lumineux ou non. Mais, lorsqu'ils sont portés à l'incandescence, il peut se présenter de curieux phénomènes; par exemple : si on regarde directement une flamme d'alcool salé, on verra les raies du sodium très-brillantes, et si on interpose cette flamme sur le trajet d'un faisceau lumineux émané du soleil ou des charbons polaires de l'arc voltaïque, on verra se développer dans le spectre une raie noire très-marquée à la place de la raie D de Fraünhofer (Foucault). Les vapeurs de strontium, de fer et d'autres métaux produisent des effets semblables, mais en des points différents du spectre (Bunsen). Pour obtenir ce résultat, il est une condition indispensable : la lumière qui traverse la flamme doit être plus intense que cette dernière. Pour s'assurer de la parfaite coïncidence des raies en question, on éclaire moitié de la fente avec la lumière du métal, et l'autre moitié avec la lumière du soleil ou des charbons; comme la lumière solaire a déjà les raies sombres D, cette raie se trouve seulement renforcée par l'action de la flamme, tandis qu'elle est créé dans la lumière des charbons.

Ces phénomènes, désignés sous le nom d'*inversion du spectre*, nous conduisent à la loi suivante : une substance à l'état de vapeur absorbe exclusivement les rayons qu'elle émet en brûlant, et, en général, le pouvoir absorbant et le pouvoir émissif des rayons sont complémentaires. Tyndall, dans ses recherches sur le

rayonnement relatif et la termochrose des gaz, avait déjà formulé cet énoncé dont l'exactitude avait été reconnue, pour le cas des solides, par la Provostaye et Desains.

Conclusion.

La conclusion à tirer des faits précédents est évidente : 1° l'éther peut propager toutes les vibrations des corps, quelles que soient leur espèce et leur longueur, et si les vibrations d'un corps sont en nombre déterminé et limité, il en sera de même pour les ondulations éthérées correspondantes ; 2° toutes les fois que les molécules du corps pesant peuvent accomplir un mouvement semblable à celui dont l'éther est animé, la force vive de l'éther sera absorbée, car elle se communiquera à la matière pondérable elle-même. Or les particules d'un corps ne peuvent pas vibrer à l'unisson de toutes les ondes éthérées, et cette faculté se rencontre seulement en celles qui ont une masse et une élasticité déterminées, de telle sorte que l'éther communiquera sa force vive à celles-là à l'exclusion des autres qui ne participeront nullement au mouvement. Ces phénomènes sont tout à fait comparables à ceux observés par les musiciens sur les instruments à cordes, qu'on a appelé phénomènes de *résonnance.* Si dans le voisinage d'une harpe, on produit un son, aussitôt celles des cordes de l'instrument qui peuvent résonner à l'unisson entrent en vibration, et les autres restent silencieuses. Dans ce cas, les cordes ébranlées ont reçu la force vive nécessaire à leur mouvement de l'air qui propageait les ondes sonores.

Théorie du renversement des spectres.

Le fait dont nous nous occupons actuellement étant d'une importance fondamentale dans notre théorie, doit être analysé avec soin. Prenons pour exemple l'inversion par la flamme du sodium dans le spectre fourni par les charbons polaires d'une batterie voltaïque. En superposant les deux flammes, nous développons deux mouvements ondulatoires sur une même ligne droite ; dans le premier, c'est-à-dire dans celui qui émane du sodium en ignition, les ondes éthérées ont la longueur de celles qui correspondent à la raie D obscure dans le spectre solaire, soit $0^{mm},0006$. Désignons par Mv^2 la force vive de cette oscillation. De leur côté, les charbons électriques émettent des ondes de même longueur, mais d'une intensité différente, soit MV^2. Lorsqu'elles traversent la flamme du sodium, les molécules de ce métal étant susceptibles de vibrer à l'unisson,

seront mises en mouvement en empruntant aux ondes existantes dans l'éther la force vive nécessaire, quantité qui sera généralement une partie aliquote de la force vive de l'onde lumineuse émise par les charbons, car dans le sodium la masse d'une molécule est notablement plus grande que dans l'éther. Représentons cette fraction par $K\,Mv^2$. Alors la somme des forces vives appartenant aux molécules sodiques en vibration est $Mv^2\,(1 + K)$. Si cette somme égale MV^2, il n'y aura ni augmentation ni diminution de l'intensité lumineuse; mais quand la somme des deux termes sera moindre que MV^2, il y aura diminution de lumière; toutefois l'extinction ne sera jamais totale, car la molécule du sodium ayant toujours une certaine vitesse, produira de son côté une excitation résiduelle dans l'éther. Ainsi, dans le soleil, les raies D ne sont pas absolument noires et peuvent être renforcées par nos flammes artificielles; mais si la couche est très-épaisse, le noir paraîtra complet. On comprend alors pourquoi les raies d'absorption peuvent être *nébuleuses*, c'est-à-dire incomplétement noires. Ainsi se présentent les raies atmosphériques, terrestres et plusieurs autres qui se voient dans les spectres stellaires.

Conclusion. Ces faits démontrent l'inertie de l'éther, par conséquent sa matérialité. Ils nous fournissent également un principe pour expliquer l'absorption des rayons par un grand nombre de corps, et l'égalité des pouvoirs absorbants et émissifs d'une même substance, car nous admettrons désormais que les molécules absorbent la force vive des ondes dont le rhythme vibratoire est le même que celui de leurs propres oscillations.

Influence de la structure moléculaire. A ce principe général, il faut ajouter une autre cause très-puissante, l'irrégularité des molécules des corps. Cette influence nous semble démontrée par les beaux travaux de Tyndall : il a établi que le pouvoir absorbant des gaz augmentait d'intensité à mesure que la structure moléculaire devenait plus compliquée. Ainsi la vapeur d'eau absorbe soixante fois plus qu'une masse égale d'hydrogène et d'oxygène[1]. De même le pouvoir

[1] Tyonall, *Philos. trans.*, 1862. Magnus a contesté l'exactitude de ce nombre 60, et d'après lui le pouvoir absorbant de la vapeur serait 5 à 6 fois celui de l'air atmosphérique. Nous nous sommes livré à quelques recherches pour éclaircir ce point douteux, et à la suite d'expériences faites en été et en hiver sur l'absorption de la chaleur solaire, nous sommes arrivé aux conclusions de M. Tyndall. Le prof. Garibaldi, de Gênes,

absorbant de l'ammoniaque vaut cent cinquante fois celui des gaz qui entrent dans sa composition. Enfin le gaz oléfiant, les principes odorants des fleurs, les vapeurs des divers alcools et éthers, sont des corps dont le pouvoir absorbant est porté à un très-haut degré, et le savant physicien n'hésite pas à attribuer cette propriété à la complication de leur molécule chimique. On peut, jusqu'à un certain point, expliquer ce résultat; il est facile aux ondes de l'éther de contourner les molécules des gaz indécomposables à cause de la forme de ces molécules qui, très-probablement, est une forme sphérique ou, tout au moins, celle d'un solide géométrique très-simple. Au contraire, dans les corps d'une structure compliquée, les molécules sont anguleuses, polyédriques, et dès lors les mouvements vibratoires s'éteignent rapidement, de même que les corps mous et filamenteux assourdissent le son, et que les écueils forment obstacle à la propagation des vagues de l'Océan et les brisent.

Travail fait par l'onde absorbée.

Lorsqu'une onde lumineuse s'éteint, sa force vive ne s'anéantit pas, mais il y a transformation de travail : une vibration plus lente est imprimée à toute la masse du corps pesant et se traduit au dehors soit par une élévation de température, soit par une désagrégation des molécules composées, dont les atomes élémentaires sont dissociés. On dit alors que la lumière opère une décomposition chimique; ces décompositions photogéniques sont très-remarquables et elles doivent nous arrêter un instant. Nous en ferons l'objet du chapitre suivant; pour le moment, nous présenterons quelques réflexions intéressantes ayant trait au sujet dont il vient d'être question.

Identité de la matière dans l'univers.

Le spectroscope nous fournit une des preuves les plus splendides de l'identité de la matière dans l'univers : car il nous permet de soumettre les astres à l'analyse chimique la plus délicate en examinant simplement, suivant des procédés spéciaux, la lumière qu'ils nous envoient. On a reconnu ainsi qu'il y a unité de composition chimique entre les diverses parties du monde céleste. Au point de vue de l'analyse spectrale, toutes les étoiles peuvent être ramenés à quatre types principaux[1].

a aussi mis hors de toute contestation le résultat de Tyndall, et pour l'eau en vapeur, il a trouvé une force absorbante 1393 fois plus forte que pour l'air à pression égale.

[1] Il ne faut pas confondre ces types avec ceux de M. Rutherfurd : ses types étaient

Analyse spectrale des étoiles.

Premier type. — Les étoiles blanches, telles que Sirius et α de la Lyre, les brillantes β, γ, δ, ε, ζ de la grande Ourse, etc. Le spectre de ces astres est presque continu, cependant on y distingue trois raies noires assez larges : l'une est dans le rouge au niveau de la raie solaire C, l'autre dans le vert bleu et coïncide avec la raie solaire F ; la troisième, située dans le violet, est voisine de la raie solaire G. Ces trois raies sont les raies principales renversées de l'hydrogène. Les étoiles très-brillantes donnent une quatrième raie dans le violet un peu plus loin que la précédente et qui appartient aussi à l'hydrogène. Il existe aussi des raies très-fines dans le vert et le jaune, appartenant au sodium, fer et magnesium, mais on les distingue avec peine. Toutefois, si le spectre paraît continu, cela tient à l'insuffisance du grossissement sous lequel on peut l'observer. En effet, la lumière des étoiles étant très-faible, il est impossible de voir ces détails sans recourir à de puissants instruments ; et si cette difficulté n'existait pas, très-probablement on observerait de nouvelles raies qui nous échappent à cause de leur finesse. On en conclut que ces astres sont enveloppés d'uue atmosphère très-dense d'hydrogène.

Deuxième type. — Les étoiles jaunes, exemple : Pollux, la Chèvre, Arcturus, etc. Ces étoiles donnent un spectre identique à celui de notre soleil ; les raies sont aussi distinctes et en nombre égal, de plus elles occupent les mêmes positions relatives.

Troisième type. — Les étoiles rouges, parmi lesquelles se trouvent α d'Orion, α d'Hercule, δ de Pégase et d'autres. Leur spectre présente deux sortes de raies parfaitement distinctes. Les unes ne sont que les raies ordinaires du spectre solaire, seulement elles ont une plus grande largeur, et sont mieux accentuées, circonstance qui fait croire à une absorption plus énergique des substances caractérisées par ces raies. Les raies du fer en particulier sont très-intenses. Outre ces raies ou lignes fines, on remarque des zones ou bandes sombres semblables à celles qui sont produites dans le spectre solaire par l'atmosphère terrestre et sont nommées bandes nébuleuses; vraisemblablement elles sont de

seulement disposés selon les couleurs apparentes et non sur les raies spectrales comme les nôtres. M. Schellen, dans la traduction de notre ouvrage *le Soleil*, a fait erreur sous ce rapport.

même nature que ces dernières, car elles ne peuvent être décomposées en lignes fines. Ces deux classes de raies sont parfaitement distinctes, et il ne faut pas confondre les *zones* ou bandes avec les raies ou stries.

Quatrième type. — Quelques étoiles rouges présentent un aspect différent de celui des étoiles appartenant au troisième type, si bien que ces astres forment réellement un nouveau groupe. On observe dans le spectre qu'elles fournissent un petit nombre de stries lumineuses assez vives et séparées par de larges espaces colorés. Ordinairement il existe trois zones très-distinctes : une dans le rouge, l'autre dans le vert et une troisième dans le bleu. Les limites des couleurs coïncident avec les lignes noires du carbone. On est par là porté à croire que les zones noires de ces étoiles sont produites par une absorption énergique exercée dans leur atmosphère, principalement par cette substance. Il est bon de rappeler que les étoiles rouges sont ordinairement variables. Ainsi o de la baleine, dite *Mira* la merveilleuse, dans son état brillant, appartient au troisième type, mais lorsqu'elle est petite, elle présente seulement quelques lignes brillantes isolées.

Les nébuleuses donnent un spectre complétement différent de celui des étoiles. Il se réduit à trois lignes brillantes : l'une d'elles, qui est la plus vive, appartient au système du gaz azote; une autre occupe la place de la raie solaire F, laquelle se rapporte à l'hydrogène; la troisième est inconnue. Nébuleuses.

Le spectre des comètes est tout spécial; il est formé de trois zones une verte vive, l'autre violette, la dernière jaune. Il a été difficile jusqu'à présent de déterminer au juste la nature de ces raies : elles se rapprochent suffisamment de celles des nébuleuses ou plutôt des étoiles de quatrième type (sans toutefois coïncider avec elles) pour que l'on soit autorisé à regarder les comètes comme de véritables nébuleuses; et à leur attribuer une lumière propre. La comète de Winnecke, en 1868, présentait le spectre du carbone dans le carbure CH, or le carbone ayant été trouvé dans plusieurs aérolithes, ces découvertes montrent que la matière qui existe aux confins de l'espace ne diffère pas en nature de celle que nous manions chaque jour. En diffère-t-elle par l'état moléculaire? C'est là ce dont il est difficile de se faire une Comètes.

idée exacte. Nous avons déjà, dans un chapitre précédent, dit quelques mots sur l'état de dissociation dans lequel se trouve probablement la matière des comètes : les résultats fournis par l'analyse spectrale confirment la vérité de nos assertions.

CHAPITRE V

ACTIONS CHIMIQUES PRODUITES PAR LA LUMIÈRE. FLUORESCENCE, PHOSPHORESCENCE.

Décomposition chimique par la lumière.

La lumière produit des combinaisons et des décompositions. Ainsi, lorsqu'un sel d'argent est exposé aux rayons solaires, il noircit, parce que le sel est décomposé : le métal reste sous forme d'une poudre très-ténue, et les autres éléments, réagissant les uns sur les autres, forment une nouvelle combinaison. Après l'impression lumineuse, toute portion du sel qui n'a pas été décomposée peut être dissoute par l'hyposulfite de soude ou le cyanure de potassium, tandis que les mêmes sels n'exercent aucune action sur le métal réduit. La photographie repose tout entière sur ces réactions.

Combinaison.

Réciproquement nous trouvons un exemple de combinaison directement excité par l'influence lumineuse dans la synthèse de l'acide chlorhydrique. En effet, un mélange de chlore et d'hydrogène exposés au soleil, se combine avec détonation. Bunsen et Roscoe, en diminuant convenablement la violence de cette réaction, l'ont utilisée pour mesurer l'énergie chimique des rayons lumineux ; ils ont constaté que l'éclat d'une lumière diminue toutes les fois qu'elle détermine une combinaison. Donc une partie de la force vive de l'onde se convertit en travail chimique.

Lumières artificielles.

Nos lumières artificielles présentent, elles aussi, des rayons éclairants, des rayons calorifiques et des rayons chimiques ; mais ces derniers sont très-peu nombreux, et d'autre part le pouvoir calorifique l'emporte de beaucoup sur le pouvoir éclairant. Pour le gaz d'éclairage, on a calculé en équivalents mécaniques l'éclat et la chaleur en prenant pour intermédiaire la quantité de calorique dégagée lors de la synthèse de l'acide chlorhydrique, et l'on a

trouvé que la première valeur était à peine le tiers de la seconde[1]. Les rayons chimiques existent en plus grande proportion dans les étincelles électriques des machines ordinaires, dans la lumière émise par les charbons polaires d'un courant voltaïque, et dans les flammes qui accompagnent les combustions très-violentes. Un fil de magnésium brûlant à l'air et se transformant en magnésie, nous offre le foyer lumineux le plus vif après la lumière électrique ; il équivaut à une surface solaire ayant un diamètre égal à la grandeur apparente du fil, lorsque cet astre est à 9° de hauteur au-dessus de l'horizon. Mais les propriétés chimiques et éclairantes de cette flamme sont loin d'être proportionnelles. En effet, l'éclat du soleil est à celui de la flamme du magnésium : : 325 : 1, tandis que le rapport des actions chimiques de ces deux sources est seulement de 37 : 1 ; réciproquement, la lumière électrique est très-riche en rayons chimiques comparativement à celle du soleil ; le degré thermométrique de cette lumière est évalué très-différemment ; M. Becquerel lui donne 2070° ; mais comme le platine fond en masse considérable et coule très-bien entre les pôles, opération qui demande au moins 2500 à 3000°, nous pouvons admettre qu'une forte pile normale développe une température bien supérieure. Cependant elle est bien encore inférieure à la température minimum supposable dans le soleil[2]. D'après nos propres expériences la température solaire ne peut être inférieure à cent mille degrés. La lumière électrique d'une forte pile de 30 éléments Bunsen, grande dimension, égale la lumière solaire à 12 centimètres de distance au midi du mois d'août. Ainsi, elle est bien peu de chose,

Absorption des rayons chimiques pour l'atmosphère terrestre.

Bunsen et Roscoe ont montré que la lumière solaire qui arrive aux limites supérieures de notre atmosphère est capable dans chaque minute de temps de transformer en acide chlorhydrique une colonne d'un mélange hydrochloré, ayant pour base la surface éclairée et 35 mètres de hauteur ; mais de ces rayons chimiques, un tiers seulement arrive jusqu'à la surface terrestre ; le reste est absorbé par l'atmosphère. Il nous serait facile de déterminer l'équivalent mécanique de cette force, sachant que la chaleur dégagée

[1] *Philos. trans.*, 1859, p. 890.
[2] Becquerel, *Ann. ch. et ph.*, IIIe série, vol. LXVII, p. 142.

par la combinaison de 1 centimètre cube d'hydrogène avec le chlore peut élever 1 gramme d'eau de 2°,08; sans faire le calcul, on voit facilement que le résultat serait un nombre énorme et constitue une énergie comparable à celle des rayons thermiques.

Action de la lumière sur les végétaux.

Depuis longtemps, les botanistes avaient reconnu que la lumière est nécessaire au développement de la chlorophylle dans les plantes, et que, grâce à cette action, elles peuvent croître et se reproduire. La lumière exerce donc une influence considérable sur la végétation, et il est admis désormais que les climats botaniques ne sont pas exclusivement déterminés par les lignes isothermes, et dans leur délimitation, il faut tenir grand compte de la distribution de la lumière solaire. Les nuages, en diffusant les rayons du soleil, agissent d'une manière très-efficace pour porter la fertilité dans tous les points qui, privés du rayonnement direct, seraient complétement stériles[1].

Et les animaux.

L'action chimique de la lumière ne se borne pas seulement aux phénomènes de la végétation et aux opérations de la photographie. Chacun a pu reconnaître combien était grande son influence sur la coloration de la peau des animaux, comment elle détruit un grand nombre de couleurs, tandis qu'elle favorise le développement de certaines autres : ainsi, les anciens préparaient la pourpre en avivant par l'exposition au soleil la teinte légère que présente la matière organique de certains mollusques, tels que les *Murex trunculus* et le *M. Brandoris*. On peut donc s'étonner en voyant un phénomène aussi général complétement ignoré pendant très-longtemps, et en présence d'un fait semblable, il est permis de soupçonner l'existence d'un grand nombre d'autres forces encore complétement ignorées par nous, tant est grande l'imperfection de nos connaissances en philosophie naturelle.

Opposition entre les deux règnes animal et végétal.

Il est intéressant de rappeler ici la double série de phénomènes diamétralement opposés que présentent les deux règnes des êtres vivant sur la terre, c'est-à-dire les animaux et les végétaux.

Les manifestations biologiques chez les animaux sont toujours accompagnées par des phénomènes d'oxydation, si bien que par le fait des combinaisons lentes, accomplies au sein de leur organisme,

[1] Bunsen et Roscoe, *Phil. trans.*, 1859, loc. cit.

ils produisent 8 080 calories pour chaque kilogramme de charbon converti en acide carbonique. Il en résulte donc une force mécanique disponible, utilisée par eux pour travailler. Dans le végétal, au contraire, il se produit une succession de désoxydations, et, par conséquent, chaque kilogramme de carbone, mis en liberté, doit absorber une quantité de travail égale à celle qu'il absorberait en se combinant à l'oxygène. Toute cette force vive lui est donnée par le soleil. La plante isole l'oxygène à l'état de pureté, mais il n'en est pas de même pour le carbone; ce corps, s'unissant à d'autres substances, donne naissance à des combinaisons généralement instables. Les composés ainsi formés sont brûlés par les animaux et transformés en d'autres d'une plus grande stabilité, en oxyde de carbone et acide carbonique, par exemple[1].

Les radiations obscures du côté le moins réfrangible du spectre et des corps chauds peuvent aussi exciter les réactions chimiques, mais généralement il est impossible ou tout au moins très-difficile d'obtenir des rayons chimiques sans que les corps soient rendus incandescents. Ces faits nous montrent que pour donner naissance à des rayons chimiques, la matière doit être amenée à l'état de molécules complétement isolées et libres. Nous trouvons donc encore ici la confirmation d'une loi déjà indiquée, à savoir que toute action chimique suppose une préalable atténuation de la matière, car pour vibrer de manière à engendrer des ondes tellement courtes, qu'elles puissent exciter les combinaisons et les décompositions chimiques, il faut des molécules matérielles amenées aux dernières limites de la ségrégation. Anciennement on avait refusé toute activité chimique aux rayons rouges et jaunes, mais cette proposition est inexacte, et les photographes savent parfaitement que ces rayons peuvent au moins continuer une réaction commencée par d'autres. Tyndall, ayant isolé les rayons calorifiques obscurs des rayons lumineux en leur faisant traverser une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone, n'a obtenu aucun effet chimique et seulement des phénomènes d'incandescence. Radiations obscures.

[1] Un grand problème social réclame l'attention des observateurs. La consommation du charbon comme combustible est énorme, les machines à vapeur seules jettent chaque année dans l'atmosphère 16 milliards de tonnes d'acide carbonique. Les forêts, qui de jour en jour disparaissent devant les progrès du défrichement, sont-elles capables de réduire cette masse énorme d'acide carbonique?

Phosphorescence.

Les ondes très-courtes jouissent encore d'une autre propriété : elles peuvent exciter dans les corps des ondes secondaires, suffisantes pour leur permettre de rester lumineux après la disparition du foyer dont ils recevaient les rayons. Ce phénomène est connu sous le nom de *phosphorescence*. Tous les solides, les métaux exceptés, sont phosphorescents à un degré plus ou moins prononcé ; certaines substances sont très-remarquables sous ce rapport : ainsi, le phosphore de Bologne, celui de Canton obtenu par la calcination du soufre avec des écailles d'huîtres, le spath-fluor, certains diamants, etc., brillent dans l'obscurité pendant un temps considérable. Avec la plupart des autres corps, le phénomène est encore sensible, seulement il dure un temps très-court. La phosphorescence fut regardée par les newtoniens comme une preuve très-concluante de la matérialité de la lumière, « car, disaient-ils, ce fluide est d'abord absorbé par les corps, puis il s'en échappe peu à peu[1]. » Mais cette supposition était erronée ; en effet, à supposer qu'elle fût vraie, la lumière émise par les substances phosphorescentes devrait avoir la même couleur et la même nature que celle dont elles ont subi tout d'abord l'influence ; or il n'en est rien, car chaque substance est inégalement impressionnée par les différents rayons du spectre. L'effet maximum est obtenu avec les rayons violets, et même avec les ultra-violets, c'est-à-dire à l'aide des rayons chimiques obscurs, et en outre la teinte émise par les phosphores correspond à des rayons d'une moindre réfrangibilité que ceux de la lumière active.

Principe de ce phénomène.

Un corps peut donc avoir été soumis à l'influence d'ondulations éthérées appartenant à un type déterminé, et ses molécules rester animées de vibrations d'une autre espèce ; de même un corps sonore, alors que toute excitation a disparu, nous fait souvent entendre des notes étouffées, véritables échos harmoniques du son fondamental. Nous avons en acoustique une analogie frappante. En parlant devant un piano vertical, un grand nombre de cordes se mettent en vibration, et parmi ces cordes il y en a plusieurs de ton plus bas que celui de la voix de la personne qui parle : la vibration des cordes dure assez longtemps après qu'on a cessé de parler. Nous rappellerons encore que la phos-

[1] Priestley, *op. cit.*, Per. VI, cap. II.

phorescence est plus vive et de plus longue durée lorsqu'elle se manifeste dans des espaces contenant seulement une matière très-raréfiée, et par suite sous une pression bien inférieure à celle de l'atmosphère : dans les tubes de Geissler, par exemple, les molécules jouissent alors d'une plus grande liberté. Cependant, rien ne prouve que dans ces circonstances d'autres forces, et spécialement l'électricité, ne jouent pas un certain rôle, d'autant plus que, chose remarquable, les phosphores sont constamment mauvais conducteurs de l'électricité, et d'un autre côté, la moindre trace d'humidité suffit pour empêcher la phosphorescence même dans les corps doués de cette propriété à un très-haut degré. L'action très-puissante de la lumière électrique pour exciter la phosphorescence, pourrait bien tenir à sa très-grande richesse en rayons chimiques, et même nous serions assez porté à croire que par son action directe la lumière est capable de produire l'électrisation des corps, aussi bien que peuvent le faire les actions mécaniques les plus légères ; de récentes expériences sont très-favorables à cette manière de voir, nous les citerons plus tard.

Théorie de la couleur des corps.

Les physiciens modernes ayant reconnu, par les faits précédents, que les molécules de la matière pesante pouvaient vibrer sous l'influence du mouvement de l'éther, ont adopté une nouvelle théorie de la coloration permanente des corps. Pour eux, la couleur d'un corps serait due à ce que ses molécules prendraient un mouvement vibratoire plus ou moins analogue à celui du rayon incident ; aussi repoussent-ils la théorie de Newton, fondée sur les phénomènes des lames minces.

La phosphorescence se rapproche beaucoup d'une autre classe de phénomènes dont nous allons dire quelques mots.

Fluorescence.

Les rayons chimiques obscurs n'exercent ordinairement aucune action sur l'œil ; mais en tombant sur certaines substances ils deviennent visibles ; tel est le fait appelé *fluorescence*, qui se manifeste dans les solutions de sulfate de quinine, de cyaline et dans certaines préparations tirées des hydrocarbures ordinaires. Alors les rayons deviennent visibles indirectement, car leur réfrangibilité est changée par l'action de la substance, comme l'on peut s'en assurer en regardant à travers un prisme une bande

étroite d'une substance fluorescente; on voit la couleur se décomposer en plusieurs teintes à la manière de la lumière blanche. Il est donc impossible d'admettre ici le synchronisme des oscillations propres aux molécules matérielles, et de celles appartenant à l'onde éthérée diffusée par la surface du corps; or la même chose se présentant dans la phosphorescence, on est porté à réunir ces deux ordres de phénomènes sous un seul principe, tout en les distinguant l'un de l'autre seulement parce que dans les phosphores les nouvelles vibrations durent un certain temps après l'action excitatrice de la lumière, tandis qu'au contraire elles cessent immédiatement dans les corps fluôrescents. Mais une semblable hypothèse exige que toutes les substances phosphorescentes soient fluorescentes au moins à un degré plus ou moins prononcé, et il n'en est pas ainsi dans la réalité; par conséquent, il est bon, à notre avis, de conserver les deux dénominations.

Calorescence. La fluorescence nous offre un exemple de la transformation d'ondes très-courtes en ondes plus longues. M. Tyndal a découvert le phénomène inverse, et lui a donné le nom de *calorescence*. Il expose un corps à l'action des rayons calorifiques invisibles du soleil, et le corps devient lumineux, c'est-à-dire émet des ondes plus courtes que celles dont il a subi l'impression. Ces faits nous montrent que la matière pondérable peut réagir sur l'éther.

Théorie de ces phénomènes. Relativement à ces transformations des ondes, les physiciens sont d'accord sur un point théorique fondamental : ils admettent que les phénomènes dont nous nous occupons sont causés par une vibration particulière; mais sur les détails ils sont loin de s'entendre, Les uns, considérant que dans la fluorescence, par exemple, les ondes réfléchies sont moins réfrangibles que les ondes incidentes, comparent l'effet produit à celui connu en acoustique sous le nom de *battements*. On sait que si deux sons séparés par un intervalle déterminé résonnent simultanément, un troisième son ne tarde pas à se faire entendre, plus grave que les premiers. Or, suivant l'opinion de ces physiciens, les vibrations moléculaires peuvent donner lieu à de semblables compositions de mouvement. Pour d'autres savants, les ondes de

la fluorescence se développent exclusivement dans l'éther par une action de la matière pesante, de même que dans le phénomène de l'écho, des ondes *parallèles* à la surface réfléchissante, nommées encore ondes *fixes*, prennent naissance et restent parfaitement distinctes de celles qui, renvoyées régulièrement, ont éprouvé une simple réflexion. (Amgstroem.)

A notre tour, nous risquerons une explication. En regardant les vagues déferler sur la grève, nous avons fait cette remarque que lorsqu'elles approchent de la terre et que l'influence du fond se fait sentir, leur crête devient parallèle au rivage, puis elles se brisent et alors produisent des ondes réfléchies dont la longueur est toute différente de celle que présentait le flot venu de la haute mer. Or, qui nous empêche d'admettre que dans la fluorescence, les ondes de l'éther, en rencontrant certains corps, se brisent et donnent naissance à des ondes d'une réfrangibilité différente, puisque celles-ci sont diffusées par la surface réfléchissante. Je dis diffusées, car il en est réellement ainsi de la lumière renvoyée par les substances fluorescentes, puisque ces corps sont visibles dans toutes les directions. Essai d'une nouvelle théorie.

De nouvelles recherches sur ce point délicat permettront de trouver la véritable théorie des phénomènes. Pour le moment, faisons remarquer simplement : Résumé.

1° Que la combinaison des ondes de l'éther avec celles de la matière pesante peut donner naissance à des mouvements résultants différents de ceux auxquels ils sont dus ;

2° Qu'une production de lumière n'est pas toujours un effet d'une haute température, car pendant certaines réactions soit chimiques, soit moléculaires se développent quelquefois des ondes assez courtes pour impressionner le sens de la vue. Nous citerons comme exemples les lueurs dégagées par quelques insectes et mollusques marins, celles qui accompagnent l'oxydation lente du phosphore, la putréfaction des poissons et plusieurs autres phénomènes de combustion lente.

Jusqu'à présent, on n'a pas constaté l'existence d'actions mécaniques sur des masses considérables dues à l'influence directe de la lumière, à moins de regarder comme tels les faits observés par Poggioli sur les plantes *sensitives*, qui, exposées aux rayons Actions mécaniques de la lumière.

directs du soleil, se ferment aussi complétement que si on les avait touchées avec un corps étranger[1].

Mais si par leur action directe les radiations lumineuses ne sont point capables de produire des effets mécaniques, elles sont indirectement la cause de phénomènes de ce genre extrêmement nombreux, et nous devons dire quelques mots à ce sujet.

CHAPITRE VI

RÉFLEXIONS SUR LES EFFETS MÉCANIQUES DES RADIATIONS LUMINEUSES. — HYPOTHÈSE SUR LA STRUCTURE INTÉRIEURE DES CORPS DÉDUITE DE LA THÉORIE DE L'ÉTHER.

Travail exécuté par la lumière.

Dans les chapitres précédents, nous avons réuni un grand nombre de faits relatifs à la chaleur et aux réactions chimiques, et nous avons fait voir peu à peu qu'ils se réduisent à de simples phénomènes de mouvement ; il convient maintenant d'envisager ces questions à un point de vue général.

La force vive des radiations solaires calorifiques et chimiques peut se communiqur à la matière pesante en produisant un travail intérieur ; ce travail est double, il comprend un certain effet thermique et une action chimique.

Travail thermique.

D'abord la première impression des radiations solaires sur la matière pesante consiste dans l'élévation de la température, c'est-à-dire dans l'accroissement du calorique d'état. Le mouvement de l'éther étant convertible en mouvement des atomes matériels, réciproquement ceux-ci à leur tour peuvent communiquer leur agitation à l'éther. Or, d'ordinaire, un corps qui absorbe de la chaleur présente une température inférieure à celle de la source dont elle émane ; il en résulte que les ondes solaires, de courtes, deviennent longues ; mais celles-ci, ne pouvant pas traverser certains corps diaphanes (une couche d'air épaisse, par exemple, ainsi que l'a montré Melloni), une grande partie du mouvement solaire reste acquise à la masse pesante et à l'éther qu'elle renferme. Pour fixer

[1] Voy. Œuvres de Poggioli. Rome, 1862.

les idées à ce sujet, nous rappellerons que sur la somme de radiations solaires arrivant aux limites supérieures de notre atmosphère, trois quarts seulement pénètrent jusqu'à nous, mais on peut regarder la fraction absorbée comme conservée par les corps terrestre et les couches inférieures de l'atmosphère. A l'effet thermométrique succède un changement d'état; alors le travail absorbé est tout entier utilisé pour modifier l'arrangement moléculaire.

Opinion de Fresnel.

Il est bon de rappeler ici comment Fresnel s'exprimait à ce sujet longtemps avant que les théories thermo-dynamiques fussent développées. « Il est probable que dans ces différents cas (d'absorption) une partie de la lumière se trouve dénaturée et changée en vibrations calorifiques qui ne sont plus sensibles pour nos yeux, parce qu'elles ne peuvent plus en pénétrer la substance ou faire vibrer le nerf optique à leur unisson, en raison des modifications qu'elles ont éprouvées[1]. Mais la quantité totale de la force vive doit rester la même, à moins que l'action de la lumière n'ait produit un effet chimique ou calorique assez puissant pour changer l'état d'équilibre des particules du corps, et avec lui l'intensité des forces auxquelles elles sont soumises, car on conçoit que si ces forces s'affaiblissaient tout à coup, il en résulterait une diminution subite dans l'énergie des oscillations des particules du corps chauffé, et par conséquent une absorption de chaleur, pour me servir de l'expression usitée. C'est peut-être ainsi que les choses se passent quand un corps solide se liquéfie ou quand un liquide se vaporise[2]. « Dans ce passage, Fresnel admet la transformation de la lumière en chaleur et il indique, d'une façon un peu obscure, il est vrai, mais suffisante, comment, dans tout changement d'état, il se produit un travail qui absorbe une certaine quantité de la force vive des ondes lumineuses.

Les radiations solaires déterminent, avons-nous dit, de nombreuses réactions chimiques; nous allons rappeler les faits connus à ce sujet, et ce rapide examen achèvera de rendre par-

[1] Cette opinion a été justifiée par l'expérience, car on a reconnu que les milieux de l'œil étaient aussi athermanes que l'eau. (Janssen.)

[2] Fresnel, *Suppl. à la Chimie de Thomson*, p. 136, à la fin.

faitement claires nos idées sur la transformation des ondes lumineuses. Les plantes, pour se développer, empruntent au monde extérieur de l'acide carbonique, de l'eau et quelques sels minéraux. Dans tous ces composés, la molécule est formée d'atomes peu nombreux, mais enchaînés par des liens étroits. Les rayons du soleil séparent les atomes les uns des autres, et les mettent à même de former de nouvelles combinaisons d'une structure plus complexe, et, par suite, d'une plus grande instabilité. C'est ainsi que se sont formés les tissus ligneux, les résines et toutes les autres substances organiques que nous brûlons dans nos foyers, ou qui, consommées par les animaux, alimentent la combustion physiologique.

Travail chimique dans les plantes.

Travail disponible dans les végétaux.

Ainsi, à parler rigoureusement, la croissance des végétaux a pour point de départ une décomposition, et la croissance des animaux a pour source immédiate une combinaison. Dans la première de ces merveilleuses opérations, la force vive de la vibration solaire, restant emmagasinée au sein de la matière pesante, représente une puissance mécanique disponible, car si on brûle ces arbres et ces végétaux, ils font naître de la chaleur directement, du pouvoir mécanique indirectement.

Et maintenant que nous avons esquissé le tableau des grandes harmonies de la nature, ne devons-nous pas nous demander s'il n'est point donné à l'esprit de l'homme de comprendre le secret de ces admirables transmutations? Nous avons établi que, contrairement à l'ancienne opinion, la lumière n'était pas une substance combinée avec divers éléments des corps, mais qu'elle était un mode de mouvement de l'éther. Donc, pour expliquer d'une manière plausible son intervention comme agent chimique, il faut nécessairement dire que les atomes d'oxygène et de carbone de l'acide carbonique, et d'une façon générale tous les atomes combinés les uns avec les autres, peuvent se séparer à cause de la violence de l'agitation excitée par l'impression des rayons solaires. En effet, la vitesse et l'amplitude des oscillations moléculaires peuvent, dans certaines conditions, augmenter au point de faire sortir les molécules de leurs sphères d'activité réciproques. Alors elles sont mises en liberté, soit d'une façon complète, comme cela arrive pour l'oxygène de l'acide carbonique, décomposé par les

plantes ; soit incomplétement, c'est-à-dire que les atomes, une fois séparés les uns des autres, se groupent de manière à former des molécules plus ou moins complexes, mais d'une stabilité d'autant moindre que la complication moléculaire est plus grande. Voilà comment on peut expliquer les décompositions photogéniques ; il est tout aussi facile de rendre compte des combinaisons. En effet, l'agitation incessante, inhérente aux dernières particules des corps, augmentant graduellement sous l'action continue de la lumière, il peut arriver que certains atomes pénètrent dans les sphères d'activité des atomes voisins ; un agencement spécial s'établit entre ces diverses particules matérielles qui, dès lors, restent enfermées dans une sphère d'activité commune, et, tout en se heurtant réciproquement, oscillent d'une façon synchrone. Or, au moment où ces réunions d'atomes s'effectuent, d'après les principes formulés plus haut, il doit y avoir un dégagement de chaleur et par suite assez fréquemment une explosion, comme nous le voyons lors de la combinaison du chlore avec l'hydrogène[1].

Nous avons usé des mots *sphère d'activité*, *limites des forces*, donnant à ces expressions la signification que leur accordent la plupart des physiciens ; mais nous avouerons que ce sens est loin d'être clair. Néanmoins nous continuerons à appeler toutes choses par le nom qui leur est habituellement donné, nous réservant de modifier notre langage lorsque nous pourrons expliquer ces forces sans recourir à de mystérieuses entités. Remarque importante.

Toujours est-il que présentement, abstraction faite de toute idée préconçue sur la nature des forces, nous voyons comment les réactions chimiques, au moins celles déterminées par la lumière, peuvent être ramenées à de véritables phénomènes de mouvement. Vers la fin de sa vie, Fresnel écrivait : « Si la lumière n'est qu'un certain mode de vibrations d'un fluide universel, comme les phénomènes de la diffraction le démontrent, on ne doit plus supposer que son action chimique sur les corps consiste dans une combinaison de ses molécules avec les leurs, mais dans une action mécanique que les vibrations de ce fluide exercent sur les particules pondérables, et qui les oblige à de nouveaux systèmes d'équilibre Nouvelle opinion de Fresnel.

[1] Relire le passage de Bunsen, cité p. 149.

plus stables pour l'espèce ou l'énergie des vibrations auxquelles elles sont exposées[1].

Le soleil, origine de force sur notre planète.

En présence de cette immense force vive communiquée à notre planète et à l'éther qui l'imprègne, par le soleil, sous forme de radiations calorifique et chimique, on se demandera peut-être si le rayonnement de la terre vers les espaces célestes restitue à ces espaces toute la force qu'elle en a reçue. A ce sujet, le doute est permis, malgré l'opinion contraire des physiciens, et je crois qu'il serait difficile de fournir des preuves valables à l'appui d'une semblable hypothèse. Bien plus, en tenant compte des faits exposés jusqu'ici, il paraît probable que la compensation par rayonnement porte exclusivement sur la partie des radiations solaires qui n'arrivent pas jusqu'à nous, car celle qui parvient au sol est acquise définitivement au globe terrestre sous forme de force vive emmagasinée dans les diverses combinaisons chimiques. On voit donc que la source principale de la force mécanique sur notre globe est le soleil; les rayons solaires, considérés en tant que cause du mouvement sur notre globe, n'interviennent pas seulement comme rayons chauds pour produire des phénomènes de dilatation, mais ils agissent encore par leurs propriétés chimiques et, par suite, physiologiques, car c'est le soleil qui fait croître les plantes, et ces plantes, brûlées dans l'organisme des animaux comme dans le fourneau d'une machine à vapeur, deviennent source de travail mécanique exécuté par le corps de l'animal[2], Aussi le divin poëte a-t-il pu dire, en toute vérité :

> Guarda il calor del sol che si fa vino
> Giunto all' umor che dalla vite cola[3].
>
> DANTE, *Purgat.*, XXVI.

Énergie solaire emmagasinée dans les plantes.

Répétons-le encore, pour nous, les végétaux ne sont pas des combinaisons d'une certaine matière lumineuse avec les substances

[1] Fresnel, *Suppl.* cité, *ibid.*

[2] L'immense provision de force que la nature a concentrée dans le soleil se répand dans tout l'univers par l'intermédiaire de ses rayons. La vie animale et végétale sur la terre, dans l'état actuel, de même que les puissantes manifestations géologiques des premiers âges du monde, n'ont pas eu d'autre origine (Bunsen, *Mémoire* cité, 1859.)

[3] « Voir la chaleur du soleil qui devient vin réunie à la séve qui coule de la vigne. »

organiques, mais bien de véritables récipients capables de tenir emmagasinée la force vive des rayons du soleil. Nous avons déjà expliqué en quoi consiste cet emmagasinement, et que l'effet du soleil est comparable à celui qui se fait en éloignant un corps de sa planète, et par lequel ce corps devient capable de restituer le travail dépensé pour le soulever. Ainsi les molécules éloignées entre elles par la force des vibrations solaires, deviennent capables de restituer ce travail en retombant sur elles-mêmes. Si quelqu'un nous demande de quelle manière s'accomplissent ces différentes opérations, nous répondrons qu'il ne nous est pas encore donné de le comprendre en détail, mais que cela ne constitue pas une raison pour nier ce fait certain, et son interprétation mécanique générale. Personne du vulgaire ne nie que dans une montre existe un appareil mécanique qui fait tourner les aiguilles suivant une règle définie, quoiqu'il ignore la construction intérieure de l'instrument. Admirons ici l'ordre admirable qui a présidé à la création; cette masse lumineuse et incandescente placée au centre de notre monde planétaire, non-seulement, par la gravitation, entretient le mouvement des astres qui circulent autour d'elle, mais encore, par ses radiations, répand la vie à la surface de chacun d'entre eux.

Qu'il nous soit maintenant permis de compléter les indications fournies sur ce point intéressant par quelques conjectures qui découlent tout naturellement des faits précédents.

Conjectures sur la constitution des corps.

L'existence de l'éther étant acceptée, et nous sommes pleinement autorisés à le faire, nous devons, en outre, admettre que les distances des atomes matériels entre eux sont très-grandes par rapport à leurs dimensions, et que ces grands intervalles sont occupés par l'éther; cependant il ne faut pas tomber dans l'exagération et comparer les distances respectives des atomes de la matière à celles des planètes dans les espaces célestes.

Nous supposons, de plus, chaque molécule pondérable animée d'un mouvement de rotation, et sa forme n'étant pas sphérique, il doit se former autour de chacune d'elles une couche dans laquelle l'éther ambiant diminuera de densité, ses atomes étant refoulés excentriquement par la force centrifuge qu'engendre la rotation moléculaire. Donc, aux limites de cet espace subsistera une cer-

taine pression, à laquelle fera équilibre le milieu environnant.

Tourbillons moléculaires.

Lorsqu'un solide tourne au milieu d'un fluide, le plus souvent un certain nombre des molécules du milieu prennent part au mouvement gyratoire. Si la vitesse est plus grande que celle à laquelle le milieu peut revenir en équilibre en se transportant, il restera autour de ce centre un vide partiel, comme celui que laisse derrière lui un aérolithe. Ce phénomène peut bien se produire entre l'éther d'une part et les molécules pondérables de l'autre; par conséquent on peut admettre, autour de ces molécules, de véritables tourbillons éthérés, mais cela n'est pas absolument nécessaire, et même en refusant d'admettre ces tourbillons, on doit reconnaître que l'atmosphère éthérée de chaque molécule doit être dilatée par l'effet de la rotation moléculaire. Quoi qu'il en soit, qu'il y ait gyration ou non, pour la simplicité du langage, nous appellerons tourbillon la sphère dilatée qui environne la molécule. Dans le cas du mouvement de ce tourbillon, son axe de rotation sera fixe ou variable de position suivant qu'il en sera ainsi de l'axe de rotation de la molécule centrale. Au sein d'un milieu ainsi constitué, les tourbillons éthérés devront, par effet de force centrifuge, tendre continuellement à s'éloigner, jusqu'à ce que leur développement soit devenu suffisant pour qu'il y ait équilibre entre les effets centrifuges et les pressions extérieures. Mais si les tourbillons sont trop rapprochés, la diminution de pression qui existe près de leurs centres n'étant pas, en cette région, compensée par la force centrifuge, ils pourront se réunir et former un tourbillon unique, dont le mouvement sera la résultante des divers mouvements partiels. Un phénomène de ce genre s'observe quelquefois à la surface de l'eau. Par conséquent, il y aurait des tourbillons simples et d'autres composés. Or, il est fort rationnel d'admettre que les premiers appartiennent aux molécules des corps simples, et les seconds aux molécules des corps composés.

Tourbillons composés.

Lors de la rencontre de deux molécules enveloppées de leurs tourbillons, il pourra se faire que, grâce à la vitesse dont elles sont animées, elles ne puissent arriver à se toucher, car la force centrifuge des atmosphères éthérées les a éloignées l'une de l'autre avant que le contact ait pu se produire. Le plus ordinairement, l'effet contraire se produira; alors il y aura pénétration réciproque

des deux tourbillons, si la force qui a projeté les deux molécules l'une contre l'autre n'a pas été assez intense pour lès faire rebondir, et ainsi les éloigner suffisamment après le choc, elles resteront réunies, et leurs tourbillons se fusionnèront en un seul ; si la force de projection est suffisamment énergique, elles se sépareront après le choc, et chacune d'elles restera enveloppée de son tourbillon propre.

Tourbillons dans les différents états de corps.

Dans les gaz, la vitesse de projection étant énorme, si les atomes se rencontrent, ou bien ils n'arriveront pas même au contact, ou tout au moins, si le contact a lieu, l'effet de ressaut sera assez prononcé pour que les derniers atomes conservent leur indépendance réciproque. Que la force de propulsion vienne à diminuer, les molécules ne pourront rebondir indéfiniment, mais s'arrêteront à une limite telle que la gravité équilibrera leur effort propulsif, et l'on aura un corps liquide. Enfin, si la vitesse de projection s'affaiblit encore, les atomes ne posséderont plus une force suffisante pour que les tourbillons une fois réunis puissent se séparer. Dès lors ils se réuniront les uns aux autres ; le plus souvent, les nouveaux groupes ainsi formés auront une orientation commune, et un corps solide prendra naissance. Nous ne disons pas que les diverses molécules réunies de cette manière resteront exactement en contact les unes avec les autres, mais elles se trouveront alors à une moindre distance qu'auparavant, et les tourbillons de chacune d'elles coexisteront comme partie d'un tourbillon général. Ainsi, dans les liquides, il règne un parfait équilibre entre la force centrifuge, la force de projection et la raréfaction des couches contiguës aux atomes. Voilà pourquoi les molécules obéissent presque exclusivement à la gravité, d'où la propriété des liquides de présenter toujours une surface libre de niveau et parfaitement continue.

Travail de changement d'état dans ces tourbillons.

Rappelons que dans le livre premier nous disions : Lors de la fusion d'un solide il doit se faire deux espèces de travail : 1° un pour désorienter les atomes ; 2° un autre pour les dilater. Or ce double travail ne doit pas seulement s'effectuer sur les atomes, mais encore sur les tourbillons, qui possèdent, eux aussi, une direction commune. Peut-être à ce sujet nous fera-t-on une objection, on nous dira : D'après votre théorie il ne doit point y

avoir de travail absorbé pour la dilatation moléculaire, lors de la fusion d'une de ces substances, qui, de même que la glace, prennent un moindre volume en devenant liquides. Notre réponse sera facile : la contraction observée est seulement apparente, parce que si la dilatation ne se traduit pas sur les grandes masses, elle ne s'en produit pas moins dans leurs plus petites parties. Les molécules cristallisées, en perdant leur orientation, doivent s'éloigner les unes des autres, au moins suivant certaines directions, car dans les solides, les distances intermoléculaires ne sont pas les mêmes dans tous les sens, tandis que le contraire arrive dans les liquides. Or, lorsque les molécules auront pris ces positions régulièrement espacées, pouvons-nous décider si la variation de volume de la masse totale sera positive ou négative ? par conséquent ne soyons pas surpris de voir survenir, pendant la fusion d'un solide, tantôt une dilatation, tantôt, au contraire, une contraction. Au reste, même en laissant de côté le travail de dilatation, on expliquerait d'une façon très-satisfaisante comment toute liquéfaction nécessite l'absorption d'une grande force vive, en rappelant qu'à ce moment il doit se faire deux travaux, d'abord une désorientation des molécules, et, de plus, une distribution uniforme de l'éther autour de chacune d'elles.

Pression de l'éther.

Dans cette théorie, la cohésion des solides s'expliquerait complétement par la pression que l'éther environnant exerce pour rétablir l'équilibre troublé par la dilatation que développe dans leurs couches centrales la rotation des molécules pondérables. Ainsi on reviendrait à cette opinion de Galilée, que la ténacité des corps est la mesure de la résistance de leurs dernières particules à la formation des vides interstitiels. Bien entendu qu'il faut prendre ici le mot de vides, non pas dans le sens d'espaces privés d'air, mais d'intervalles dans lesquels l'éther fait défaut.

Sphères d'activité, etc.

Actuellement nous pouvons préciser la signification des termes *sphères d'attraction*, *sphère d'activité;* ces mots désignent pour nous les sphères, ou mieux les régions occupées par l'éther dilaté, et cette dilatation se faisant sentir seulement sur une couche d'éther infiniment mince (eu égard à nos unités de mesure linéaires), on conçoit pourquoi les sphères d'activité sont d'un rayon excessivement petit.

C'est chose à peu près certaine qu'il n'y a point parité complète de forme ni de dimensions entre toutes les molécules des corps pesants; et cette diversité de configuration doit exercer une notable influence sur les tourbillons qui se forment autour de chacune des dernières particules de la matière. Par conséquent, rien ne nous empêche d'admettre que tous ces tourbillons ne présentent ni la même vitesse ni la même masse, et ainsi s'expliquerait la variété des propriétés chimiques et physiques spéciales aux diverses substances de la nature.

Pour les atomes de l'éther il en est autrement, et nous pouvons très-vraisemblablement les regarder comme étant tous de même masse, de même volume, de même forme et animés d'un même mouvement de rotation, en vertu duquel ils ont tous le même degré d'élasticité. Il n'y a donc aucune raison pour qu'un tourbillon se forme autour de tel atome de préférence à tel autre : aussi un milieu exclusivement formé d'atomes éthérés restera homogène, c'est-à-dire uniformément dense.

Éther dilaté à l'intérieur des corps.

Ce que nous avons dit des molécules matérielles isolées s'applique d'ailleurs à des molécules groupées de manière à former un corps. Par conséquent, au sein de tout assemblage de masses pesantes se manifestera une raréfaction de l'éther qui s'étendra même à l'éther extérieur, mais en décroissant rapidement d'intensité à mesure que la distance augmentera, pour devenir bientôt une simple diminution de pression de certaines couches du milieu ambiant. Les belles recherches de Regnault sur le son montrent que, dans le voisinage des corps vibrants, l'air est réellement dilaté; elles sont donc favorables à nos idées théoriques sur l'état de l'éther au sein de la matière pesante considérée à l'état de vibration et de rotation.

Molécules chimiques.

A l'aide de cette hypothèse, il est facile de s'expliquer les réactions chimiques; on peut, en effet, regarder les combinaisons comme produites simplement par la réunion de deux ou plusieurs tourbillons moléculaires *différents les uns des autres par l'étendue et par la vitesse*. L'affinité chimique ne diffère pas, en principe, de l'affinité homogène, c'est-à-dire de la cohésion. Toutes les découvertes de la science moderne viennent à l'appui de cette manière de voir. Ainsi, après les expériences de H. Sainte-Claire

Deville, peut-on ne pas rapprocher des phénomènes de l'évaporation certaines actions chimiques qui s'accomplissent lentement?

Origine des degrés d'affinité.

Plus les atmosphères sont inégales, et par leur volume et par leur vitesse, plus il y a de chances pour que l'équilibre soit rompu, et plus l'affinité chimique a d'énergie, car un grand tourbillon absorbera facilement un autre moins étendu, tandis que deux tourbillons égaux pourront rester l'un à côté de l'autre sans se réunir, leurs réactions étant toujours parfaitement équilibrées. Ainsi l'intensité et la rapidité des combinaisons dépendent de la dissemblance des atmosphères moléculaires; si bien que l'on peut expliquer de cette manière l'échelle d'affinité établie par les chimistes. Lors de la fusion des atmosphères inégales appartenant aux atomes qui prennent part à une action chimique, il doit nécessairement se produire un changement dans la quantité d'éther formant chacune d'elles, et alors l'atmosphère de la molécule résultante peut parfaitement ne pas représenter une quantité d'éther égale à la somme de celles qui formaient les atmosphères partielles des atomes combinés. Ces considérations nous serviront plus tard à expliquer comment pendant les combinaisons chimiques se produisent de véritables flux éthérés, des courants, qui engendrent toute une classe de phénomènes nouveaux dont nous aurons à parler.

Actions chimiques de la lumière.

Jusqu'ici nous avons considéré d'une manière très-générale le problème de l'affinité chimique; appliquons maintenant notre hypothèse au cas particulier des réactions chimiques déterminées par la lumière. Les ondes lumineuses, en rencontrant les corps pesants, leur communiquent une certaine quantité de mouvement, laquelle trouble l'équilibre dynamique des molécules, d'où destruction de certains groupes atomiques et formation de nouveaux tourbillons généraux. En effet, les molécules subissant alors, de la part des ondes lumineuses, une succession de chocs, la quantité de forces vives qu'elles renferment augmente nécessairement. Les impulsions considérées chacune en particulier sont, il est vrai, presque insensibles, tant est faible la masse des atomes éthérés; mais elles se répètent pendant longtemps d'une façon rhythmique, et plusieurs billions de fois par seconde; par conséquent, elles parviendront à imprimer des vitesses considérables aux molécules

quand bien même celles-ci auraient une masse relativement assez grande. Dès lors l'agitation intérieure d'un corps, augmentant graduellement, arrivera à un degré tel, que, du tourbillon général d'une molécule, un certain nombre d'atomes s'échapperont et reprendront leur état d'atomes libres enveloppés chacun d'un tourbillon particulier et indépendant. Ainsi la lumière est essentiellement une force décomposante, et toutes les fois qu'elle sépare des éléments unis chimiquement, elle communique une certaine force vive à la matière pesante, car un travail quelconque se réduit toujours à une communication de mouvement malgré les résistances qui s'opposent à ce mouvement, c'est-à-dire malgré l'inertie des masses et les pressions antagonistes.

Quelquefois cependant la lumière détermine les combinaisons chimiques d'une manière indirecte. En effet : 1° plusieurs corps étant en présence et soumis à son action, elle peut mettre en liberté leurs atomes constitutifs et les placer dès lors dans les conditions favorables pour contracter de nouvelles combinaisons. Un effet de ce genre peut même se comprendre entre les corps regardés jusqu'ici comme élémentaires, car qui saurait affirmer si réellement ces substances sont absolument simples? A l'appui de notre dire, nous citerons la combinaison directe du chlore avec l'hydrogène, puisque, selon toute probabilité, le chlore est un corps composé. 2° Si cette explication ne paraît pas satisfaisante, nous dirons que la lumière peut encore déterminer la réunion d'atomes différents en augmentant la force vive des unes et des autres, à tel point que ces atomes venant à s'entre-choquer, leurs tourbillons éthérés se pénètrent pour ne plus se séparer. Cette réunion peut être favorisée par l'agitation communiquée à la masse par les vibrations lumineuses; car tous les jours nous voyons, lorsqu'une certaine force vive est communiquée à un milieu en repos, ce milieu devenir capable de produire des effets qui n'auraient pu être obtenus s'il n'eût reçu un mouvement préalable. On sait, par exemple, que le choc de deux navires est beaucoup plus dangereux pendant une grosse mer que pendant une mer calme. Actions chimiques indirectes.

Il ne nous est pas possible de savoir au juste comment les choses s'accomplissent dans tous les cas particuliers, car les atomes Analogie dans les corps sonores.

et leurs mouvements échappent complétement à nos sens; mais on ne peut se refuser à reconnaître combien nos hypothèses sont rationnelles. Ajoutons même que nous observons dans les mouvements vibratoires des corps pesants des phénomènes soit d'adhérence, soit de disjonction, qui rappellent complétement ceux dont nous admettons l'existence entre les molécules de l'éther. Ne voyons-nous pas un corps léger, un petit morceau de papier suspendu dans l'air à l'aide d'un fil, être attiré par une cloche en vibration et rester adhérent à sa surface, et, pour opposer un exemple au précédent, nous rappellerons qu'un verre se brise par l'effet des vibrations exagérées que l'on excite en lui lorsqu'on tire un son très-intense d'un corps voisin susceptible de raisonner à l'unisson.

Première objection.

Nous nous réservons de discuter ces hypothèses dans tous leurs détails; cependant il est nécessaire de répondre ici à deux difficultés qui se présentent tout naturellement.

1° Comment les mouvements rotatoires et gyratoires de l'éther peuvent-ils se conserver toujours avec la même intensité, le fluide éthéré étant doué d'inertie? On comprendrait, à la rigueur, ce résultat dans un espace complétement libre, mais il paraît impossible dans un milieu inerte et résistant, car un atome en mouvement dans un pareil milieu doit perdre peu à peu sa force vive en la communiquant aux atomes environnants.

Solution.

L'objection est spécieuse, et elle reproduit celle que Newton opposait à la théorie de l'éther interstellaire, disant que le fluide devrait retarder la marche des astres, car atomes et planètes obéissent aux mêmes lois. En restreignant la question, pour le moment, au cas des particules pesantes, nous dirons que cette argumentation repose sur un principe faux, car elle suppose que le mouvement dans une masse limitée se conserve indéfiniment, chose impossible. Considérons, en effet, une portion isolée de de l'éther, abstraction faite de l'ensemble, alors elle seule communique du mouvement à la masse entière, donc sa force vive s'épuisera rapidement. Mais en réalité les choses se passent autrement, car si certains atomes cèdent une partie de leur vitesse aux atomes du milieu universel, réciproquement ceux-ci lui restituent une quantité de force vive correspondante, et ces compensations s'établissent sous mille formes différentes. Pour citer un seul

exemple, ne voyons-nous pas le carbone en brûlant restituer au système général de l'univers la force vive que, malgré un éloignement de 90 millions de lieues, le soleil lui avait communiquée alors que, dans les parties vertes des plantes, il le précipitait de l'acide carbonique?

Dissémination de l'énergie.

Par l'expérience nous arrivons à reconnaître que jamais l'énergie ne se perd, elle se dissémine entre les corps; elle tend à s'égaliser, et lorsque cette égalité sera atteinte, la machine mondiale cessera de fonctionner; cependant cela n'est pas à craindre pour le moment. Les centres d'inégale énergie étant différemment placés agissent l'un sur l'autre, et la quantité absolue d'énergie répandue dans l'univers reste constante; mais il n'en est plus de même si l'on considère les masses limitées.

Ondes spirales.

Examinons donc comment les tourbillons peuvent se conserver autour de chaque molécule. Nous ne dissimulons pas les difficultés réelles que l'on éprouve à traiter cette question à l'aide des principes connus de la mécanique; néanmoins, si l'application laisse à désirer, le fait n'en existe pas moins. En effet, nous voyons des mouvements de gyration se propager à de très-grandes distances au sein des masses liquides, et dans l'air les trombes marines, les tourbillons de poussière parcourir un trajet de plusieurs lieues sans se rompre[1]. Ces météores se forment et se propagent très-probablement suivant les lois du mouvement ondulatoire, c'est-à-dire qu'il n'y a pas transport d'une même masse d'air en rotation, mais transmission graduelle d'un mouvement gyratoire à travers les couches successives d'une portion déterminée de l'atmosphère, et, par suite, leur théorie repose tout entière sur le jeu des forces propres aux fluides, c'est-à-dire la gravité et l'élasticité. S'il n'en était pas ainsi, on ne pourrait comprendre comment une trombe marine peut, pendant un trajet de plusieurs lieues, lancer des torrents de pluie, alors qu'une seule décharge suffirait pour débarrasser la masse d'air tournoyante de toute

[1] Procédant un jour, sur la voie Appienne, à la mesure d'une base, je vis s'élever du côté de la mer un tourbillon de poussière vertical très-mince, de 2 mètres de diamètre environ; il traversa la route en un point voisin de notre station, il alla se perdre dans les montagnes à une distance de 6 kilomètres au moins. L'air était parfaitement calme, et nous ne remarquâmes aucun courant contraire pouvant expliquer la formation de ce tourbillon.

l'eau qu'elle pouvait contenir à l'état de vapeur. Donc il se produit ici quelque chose d'analogue à la propagation des ondes; seulement dans ce dernier cas, le déplacement des molécules est limité à une oscillation autour de la position d'équilibre, tandis que dans les tourbillons il y a de plus un certain mouvement de *translation* dont la vitesse est une composante de celle du tourbillon lui-même[1].

De cette manière, on peut rendre compte des divers phénomènes observés dans la propagation des tourbillons, d'une façon beaucoup plus complète qu'on n'a pu le faire jusqu'à présent, soit en supposant un transport d'une masse d'air animée d'un mouvement gyratoire, soit en regardant les trombes comme engendrées par le conflit de deux courants opposés[2].

Dans un milieu élastique (quelle que soit du reste la cause de cette élasticité), une onde, une fois formée, continue à se propager sans nouvelle action de la cause déterminante; mais à mesure qu'elle s'éloigne des centres d'ébranlement, ce qu'elle gagne en étendue elle le perd en vitesse. A notre avis, il en est exactement de même des mouvements de gyration. En effet, l'éther est élastique, et grâce à cette propriété il peut transmettre les ondes de toutes espèces; par conséquent, il en sera autant pour les tourbillons moléculaires. Ces tourbillons prennent naissance sous l'influence d'une impulsion étrangère, et, une fois formés, pour se maintenir en mouvement ils n'ont nul besoin de recevoir incessamment une nouvelle force vive de la molécule matérielle, qui leur sert simplement d'axe de rotation et leur permet de suivre la ligne de translation de la molécule elle-même. Cela sera rendu plus évident par une démonstration indirecte. Supposons que ces tourbillons, pour se conserver, aient besoin d'une addition perpétuelle

[1] Dans l'onde solitaire, le mouvement des molécules est réellement un mouvement gyratoire à axe horizontal.

[2] On dit souvent que les trombes sont transportées par le vent, mais il est évident, d'après notre manière de voir, qu'elles peuvent se propager d'une autre façon, et en effet, dans les mers australes, les cyclones marchent dans une direction contraire à celle des courants atmosphériques inférieurs. Du reste, dans ces tourbillons météoriques il y a une source d'énergie qu'on ne doit pas oublier, c'est la chaleur développée par la condensation de la vapeur qui peut et doit expliquer leur persistance, malgré le travail exécuté à chaque instant. Nous ne prenons pas notre comparaison sous ce rapport, mais seulement pour faire comprendre que tout mouvement orbitaire peut être assimilé à un mouvement ondulatoire.

d'énergie : ce supplément devrait à chaque instant augmenter leur température, car rien ne peut se perdre ; le milieu serait donc dans une condition de température continuellement croissante, ce qui est absurde.

2° Voici maintenant la seconde difficulté ; elle est plus sérieuse. Il résulte de notre hypothèse que la densité de l'éther serait moindre dans l'intérieur des corps pesants que dans le vide. Conséquence diamétralement opposée aux idées généralement admises [1]. On pourrait dire, à la vérité, que tous les mathématiciens ne sont point d'accord sur ce dernier point. Ainsi M. Lamé est arrivé par l'analyse à des conclusions semblables aux nôtres ; pour lui, l'éther serait moins dense dans les corps les plus réfringents [2], et la matière exercerait sur l'éther une action répulsive qui, en définitive, pourrait bien n'être pas autre chose que la force de projection et la force centrifuge développées par les rotations moléculaires. Cauchy avait admis cette action répulsive de la matière sur l'éther. Briot admet dans l'éther une force répulsive ; en outre, il croit à une attraction exercée par la matière pesante sur l'éther ; du reste, il ne se prononce pas sur la question de densité [3]. Mais nous ne devons pas nous borner à mentionner les autorités scientifiques favorables à notre théorie; il nous faut interroger les faits.

Deuxième objection.

Réponse : l'éther n'est pas plus dense dans les corps.

Autorités.

Examinons comment les physiciens ont été conduits à admettre, pour l'éther contenu dans l'intérieur des corps, une densité moyenne plus grande que celle du même fluide dans le vide ; nous trouvons deux raison principales: 1° ils avaient supposé l'existence d'une certaine attraction ou condensation de l'éther autour des molécules matérielles ; condensation dont on n'a fourni aucune preuve concluante jusqu'à présent. Au contraire, d'après plusieurs mathématiciens dont nous avons rappelé plus haut les travaux analytiques, il se produit dans ces conditions une véritable

Examen de la question.

[1] M. Edland, dans une récente publication, admet comme certain que l'éther est plus dense dans les corps; nous verrons que cela est loin d'être prouvé. (*Archives des sciences de Genève*, 1873, juillet, page 2, 3.)

[2] Lamé, *Journal de l'École polytechnique*, t. XIV, cahier 23, p. 269. « Ainsi, la densité moyenne de l'éther dans les corps diaphanes est moindre que celle du même fluide dans le vide, et l'action que la matière pondérable exerce sur l'éther est répulsive. » (*Mémoire sur les lois d'équilibre du fluide éthéré*, § VI)

[3] Briot, *Comptes rendus*, t. LVII, p. 868.

répulsion ; 2° en admettant l'éther plus dense dans l'intérieur des corps, on explique très-facilement la diminution de vitesse éprouvée par la lumière lors de son passage à travers les milieux réfringents, car cette vitesse étant représentée par la racine carrée du rapport de l'élasticité e à la densité d; $V=\sqrt{\frac{e}{d}}$, si d augmente, V diminue. Mais ce raisonnement est peu concluant, car évidemment V peut diminuer, si e diminue alors même que d reste constant, ou bien encore si les deux termes du rapport varient à la fois, pourvu que e diminue plus rapidement que d, ce qui revient à admettre que la loi de Mariotte ne s'applique pas à l'éther contenu dans les corps. Cela ne doit surprendre personne, car nous savons que la formule $V=\sqrt{\frac{e}{d}}$ n'est pas suffisante pour expliquer toutes les circonstances de la propagation du son ; il faut encore tenir compte de la chaleur dégagée dans l'air par le développement des ondes.

Origine de cette opinion.

L'étude de la double réfraction a conduit les physiciens à attribuer les variations éprouvées par la vitesse de propagation de la lumière à l'influence de l'élasticité du milieu plutôt qu'à celle de la densité. Herschel[1] disait avec beaucoup de justesse : « Le seul moyen que nous ayons de mesurer l'élasticité d'un milieu est la connaissance de la vitesse des rayons lumineux dans ce milieu: si donc on ne veut pas se condamner à tourner dans un cercle vicieux, il faut s'adresser à des phénomènes d'un autre ordre pour savoir quelle est la vraie manière d'interpréter la formule précédente. » Dans la théorie de la double réfraction, on admet que les lignes de moindre élasticité pour l'éther sont celles de plus grande compression pour la matière pesante. Tels sont les axes de cristallisation, et de compression. « On doit regarder l'élasticité de l'éther dans le verre comprimé comme étant minimum suivant la direction de la force comprimante, et maximum dans la direction perpendiculaire[2]. » Dans ces circonstances, on pourrait admettre un changement de densité, mais on préfère imaginer une variation survenue dans

[1] *Traité de la lumière*, t. II, p. 182.
[2] *Traité de la lumière*, t. II. p. 206, n° 1089.

l'élasticité de l'éther. Or les mêmes suppositions sont permises dans le cas de substances ayant une densité uniforme et présentant la simple réfraction ; par conséquent, en disant que dans l'intérieur des corps la densité et l'élasticité de l'éther diminuent en même temps, mais la première plus rapidement que la seconde, nous présentons une hypothèse commode et parfaitement rationnelle.

Nature de l'élasticité.

Notre proposition sera encore plus claire si nous ajoutons que, pour nous, le mot élasticité n'est pas seulement, suivant la définition d'Huyghens, la propriété que possèdent les atomes de l'éther de revenir constamment à leur forme primitive, mais nous prenons ce mot dans son acception la plus étendue ; c'est-à-dire qu'il nous sert à représenter l'ensemble des forces qui agissent sur la masse fluide pour la ramener à son état d'équilibre aussitôt que, par une cause quelconque, cet état vient à être troublé, ces forces pouvant agir à l'intérieur ou à l'extérieur des molécules. En un mot, nous adoptons la définition suivante, donnée par Lamé[1].

« Lorsque les molécules de la matière constituent soit un corps, ou un milieu limité ou indéfini, les causes qui ont assigné à ces molécules leurs positions relatives sont en quelque sorte persistantes ou agissent continuellement, car si quelque effort intérieur change un peu et momentanément ces positions, les mêmes causes tendent à ramener les molécules à leurs places primitives ; c'est cette tendance, cette action constante que l'on désigne sous le nom d'élasticité. »

Ainsi compris, le mot élasticité ne doit pas être exclusivement réservé à rendre compte des effets de l'attraction et de la répulsion moléculaire, mais on peut l'employer pour expliquer des phénomènes à la production desquels les forces moléculaires ne prennent qu'une part très-secondaire ; par exemple, les ondes qui se forment à la surface d'une eau tranquille sous l'influence de la pesanteur.

Donc l'éther dans l'intérieur des corps pesants et celui qui occupe les espaces libres de matière pondérable, étant soumis à des influences très-différentes, il est clair que les deux termes du

[1] *Théorie math.* Paris, 1852, p. 1.

coefficient $\frac{e}{d}$ doivent varier en même temps, et il n'est pas rationnel de supposer que l'une ou l'autre de ces deux quantités puisse rester invariable.

Opinion contraire de Fresnel : résolue.

Nous examinerons encore les raisons qui conduisirent Fresnel à supposer une augmentation de la densité de l'éther dans les corps réfringents; il avait reconnu que les formules établies dans cette hypothèse rendaient exactement compte des faits relatifs à l'intensité de la lumière polarisée par une substance diaphane en éprouvant soit une réflextion, soit une réfraction. Mais Mac Cullagh et Neuman ont montré depuis que l'on arrive aux mêmes formules en attribuant à l'éther une densité uniforme, si l'on suppose le mode de propagation des rayons polarisés différent de celui imaginé par Fresnel ; enfin Cauchy, sans faire aucune hypothèse particulière sur la densité relative du milieu, mais en admettant simplement une différence des vitesses, est arrivé, par l'analyse, à des formules générales complètes, renfermant celles de Fresnel comme cas particulier, et il a signalé de nouveaux phénomènes qui, inaperçus par ce grand physicien, ont été plus tard complétement vérifiés par l'observation directe[1]. Ainsi les formules de Fresnel ne doivent plus être citées comme un argument favorable à telle ou telle théorie.

La lumière ne se propage pas par la matière pesante.

Quelques physiciens, Euler entre autres, ont pensé que la lumière pouvait se propager dans les corps par l'intermédiaire de la matière pesante elle-même, mais si l'on réfléchit à la prodigieuse vitesse des rayons lumineux, laquelle vaut plusieurs millions de fois celle du son, on reconnaîtra que jamais la matière pesante ne pourrait présenter une élasticité assez parfaite pour permettre une telle rapidité de transmission.

Opinion de Lamé.

Avec le secours de l'analyse, Lamé croit avoir démontré l'impossibilité de cette hypothèse, et ses conclusions sont que, dans l'intérieur d'un corps, on doit admettre non-seulement la matière pesante, mais encore une autre espèce de matière, véritable milieu, vibrant sous l'influence de la lumière, tandis que la matière pesante ne prend qu'une part purement passive au phénomène en

[1] Cauchy, *Exercices d'analyse et de physique mathém.*, t. I. Voy. *Comptes rendus*, t. LXII, p. 868.

modifiant, par une sorte de résistance, la direction des vibrations et les vitesses de propagation dans les diverses directions[1]. Suivant ce mathématicien, les molécules pondérables flotteraient pour ainsi dire dans l'éther et partageraient tous les mouvements dont il est agité, de même que nous voyons les corps légers nageant à la surface de l'eau, monter et descendre alors qu'ils sont rencontrés par une onde développée dans la masse liquide. Briot arrive à conclure que les molécules pondérables ne doivent pas rester immobiles pendant le passage de l'onde lumineuse; elles sont entraînées dans le mouvement, et, par suite, l'onde éprouve un certain retard qui serait la cause principale de la dispersion. Opinion de Briot.

Enfin les expériences de Fizeau sur la transmission de la lumière par les corps en mouvement, réfutent complétement la théorie de la propagation de la lumière par la matière elle-même. En effet, si les choses se passaient ainsi, lorsque la lumière traverse un corps en mouvement, sa vitesse devrait être augmentée ou diminuée de toute la vitesse propre aux molécules pesantes. Or l'expérience ne justifie pas cette déduction théorique, et elle montre qu'une fraction seulement de la vitesse du corps pesant se compose avec celle de l'onde lumineuse. Cette fraction est représentée par le coefficient, nommé, en optique, *puissance réfractive* d'une substance, et elle dépend de la différence entre les vitesses de la lumière dans le vide et dans le milieu. Fizeau, mesurant la variation de vitesse de la lumière à l'aide d'un réfracteur interférentiel particulier, a trouvé que si la lumière traversait deux colonnes d'eau animées d'une vitesse de 7 mètres par seconde, on obtenait un déplacement d'un quart de frange environ, nombre qui satisfait aux relations indiquées précédemment. Ainsi, les corps traversent l'éther comme un filet traverserait l'air, c'est-à-dire en transportant une certaine quantité de fluide, le reste passant à travers les mailles; dès lors la portion entraînée pourra influer sur la vitesse de la lumière de même que le vent fait varier la vitesse du son. Expériences contraires de Fizeau.

Le phénomène de la dispersion montre clairement que l'éther n'est pas distribué uniformément dans l'intérieur des corps pesants. Phénomènes de dispersion.

[1] Lamé, *op. cit.*, p. 327, n° 129 et 130.

En effet, d'après la loi de la propagation du mouvement vibratoire dans un milieu homogène, les ondes longues et courtes doivent se transmettre avec la même vitesse, et le fait a été vérifié (au moins dans certaines limites d'intensité) pour le son dans l'air et pour la lumière dans les espaces interstellaires. Or le contraire arrive dans les corps réfringents, et les ondes les plus courtes éprouvent le ralentissement le plus considérable; d'où la dispersion chromatique. Ce phénomène a été pendant longtemps une objection sérieuse au système des ondulations, mais Cauchy l'a complétement expliqué en admettant comme principe la non-homogénéité de l'éther contenu dans les corps pesants. Briot et Lamé, de leur côté, sont arrivés à une semblable conclusion, car, d'après leurs calculs, dans le cas d'un milieu constitué à la façon des corps pesants, c'est-à-dire de particules centrales enveloppées d'atmosphères ayant une densité non uniforme, les coefficients des équations différentielles qui expriment la vitesse de l'onde ne sont plus constants, mais variables avec la longueur de l'onde elle-même; d'où il résulte deux espèces de retard, un constant et un autre variant en raison inverse du carré de la longueur de l'onde, et c'est ce dernier qui produit la dispersion[1].

L'éther n'est pas uniformément distribué dans les corps pesants.

Si petite que l'on suppose l'oscillation moléculaire, on voit parfaitement, sans recourir aux raisonnements analytiques, qu'elle n'est point négligeable par rapport à la longueur de l'onde et au rayon de la sphère éthérée à densité variable, qui enveloppe chaque particule pesante, et dont le rayon, selon toutes probabilités, est excessivement petit. Donc, au sein des corps, les atomes éthérés oscillent réellement dans un milieu hétérogène; en outre, l'influence de cette non-homogénéité se fera sentir sur les ondes d'autant plus qu'elles auront une moindre longueur, car elles traverseront alors un plus grand nombre de couches différentes.

Analogie avec les ondes de l'eau.

A l'appui de cette explication, nous rappellerons un fait déjà cité plus haut : la théorie et l'expérience ont montré que la vitesse des ondes développées dans un fluide pesant, l'eau, par exemple, est modifiée par la présence du fond; ces ondes sont d'autant plus ralenties que l'épaisseur de la couche liquide est moindre. Or

[1] Briot, *Comptes rendus*, loc. cit.

il paraît probable que la présence des molécules pesantes dans l'intérieur des corps agit sur les mouvements lumineux comme le fait l'élévation progressive du fond de l'Océan sur les vagues de la surface.

Conclusion.

Les questions traitées dans ce paragraphe établissent une liaison étroite entre les manifestations des radiations lumineuses et la constitution moléculaire des corps; la théorie mécanique de la chaleur se trouve ainsi complétée, puisque les forces chimiques, de même que le calorique, se réduisent à des modes de mouvement. Aux personnes qui jugeraient nos hypothèses un peu trop hardies, nous répondrons que nous sommes prêts à les abandonner si on nous en fournit de meilleures; nous les prions, cependant, d'attendre pour se prononcer que nous ayons passé en revue les autres branches de la physique. Pour le moment, nous appelons l'attention du lecteur sur un point de vue nouveau et fort intéressant. Dans le mouvement ondulatoire, deux cas sont à considérer : celui où l'onde est régulière et celui où l'onde est rompue parce que l'impulsion excède les limites de l'élasticité. Les phénomènes qui se manifestent alors constituent une branche spéciale de la physique, branche qui sera étudiée dans le livre suivant.

Pour le moment, il nous reste encore à examiner toute une classe de phénomènes optiques très-curieux; cette étude sera utile pour dissiper les obscurités que pourrait encore présenter la théorie de la lumière.

CHAPITRE VII

DE QUELQUES PROPRIÉTÉS DU MOUVEMENT ONDULATOIRE DE L'ÉTHER DANS LES MILIEUX HOMOGÈNES. — POLARISATION DE LA LUMIÈRE.

Difficultés de la question.

Autant il est facile d'établir d'une manière générale que la lumière est un mouvement ondulatoire particulier de l'éther, autant on éprouve de sérieuses difficultés lorsqu'on cherche à déterminer la nature de ce mouvement et des modifications qu'il peut éprouver. Ces difficultés tiennent à deux causes principales. La première est la connaissance très-imparfaite que nous possédons des mou-

vements ondulatoires, même de ceux propres aux fluides pondérables ; fort heureusement nous avons chaque jour sous les yeux des mouvements de ce genre, et nous pouvons en observer les particularités, car les résultats fournis par le calcul ne sauraient nous en donner une idée. La seconde cause est notre complète ignorance de la constitution physique de l'éther et des forces qui le régissent ; aussi nous est-il impossible de déduire des propriétés du fluide la nature du mouvement dont il est susceptible. Au contraire, nous sommes obligés de discuter avec soin toutes les modifications des mouvements qui nous permettent d'acquérir par voie d'induction quelques notions sur la nature de l'éther. Nous ne pouvons pas, et, du reste, nous n'essayons pas d'aborder ces difficultés ; elles ne se rapportent qu'indirectement à notre sujet, mais nous voulons examiner certains faits se rattachant immédiatement à la constitution de la matière, et qui nous seront utiles dans la suite.

Double espèce d'oscillations.

On considère habituellement en mécanique deux genres de mouvements oscillatoires des milieux continus : les premiers déterminent des variations de densité dans la masse et procèdent par vibrations longitudinales parallèles à la direction des rayons; nous citerons comme exemple les vibrations sonores dans l'air et dans l'eau ; les seconds se produisent sans variation de densité du milieu, et les vibrations sont alors transversales et perpendiculaires à la direction des rayons, exemple les ondes qui se développent à la surface d'une eau tranquille sous l'influence de la pesanteur. Donc un même fluide peut propager les deux systèmes de mouvement suivant les forces mises en jeu.

Longitudinales.

Transversales.

En recherchant auquel de ces deux genres de pulsations se rattachent les ondes lumineuses, on a trouvé qu'elles devaient être considérées comme des vibrations transversales, et on a été conduit à ce résultat par l'étude du phénomène appelé par Newton *polarisation* de la lumière, parce que, pour l'expliquer, il supposait aux rayons lumineux des pôles et des côtés.

Polarisation de la lumière dans les cristaux biréfringents.

Les premiers phénomènes de polarisation furent observés par Huyghens sur les rayons réfractés émergeant d'un spath d'Islande; plus tard, Malus reconnut que la réflexion et la réfraction simples peuvent aussi polariser la lumière. Nous allons résumer ici les faits

principaux. Si un rayon solaire naturel, c'est-à-dire ayant parcouru un milieu homogène sans rencontrer d'obstacles, pénètre dans une chambre obscure et traverse un cristal de spath, il se divisera en deux rayons qui, à la simple vue, paraîtront parfaitement égaux ; mais en les dirigeant sur un miroir non étamé, faisant avec leur direction un angle de 36°, on reconnaîtra que le plus souvent ils sont inégalement réfléchis ; si alors on imprime au miroir un mouvement de rotation autour du rayon, en ayant soin de ne pas faire varier l'angle d'incidence, on constate que, pour une certaine position du miroir, un seul des rayons éprouve la réflexion ; l'autre est *éteint*. Puis, lorsqu'on continue le mouvement du miroir, il arrive bientôt dans une position telle, que le rayon qui, tout à l'heure, s'éteignait, est maintenant le seul à subir la réflexion, l'autre devenant irréflexible. Ces deux positions diffèrent de 90°. On peut répéter une expérience analogue, mais en dirigeant le rayon dédoublé par le spath à travers un milieu réfringent ; on observe alors des variations d'intensité complémentaire de celles observées dans le cas de la réflexion. Ainsi, les deux rayons isolés par le spath étant réfléchis ou réfractés, présentent dans leur intensité une série de maximum et de minimum qui se répètent pour chaque cadran, décrit par la surface réfléchissante où le corps réfringent et les maximum et les minimum correspondent toujours à des positions distantes de 180°.

Si on fait passer un des deux rayons bifurqués par le spath à travers un nouveau rhomboèdre de carbonate de chaux, généralement il se partagera en deux autres d'inégale intensité, et en faisant tourner le deuxième cristal, à chaque quart de circonférence, on verra les deux nouveaux rayons présenter alternativement un maximum d'éclat, puis une extinction complète. Dans l'intervalle d'un maximum à un minimum, les deux rayons présentent une égale intensité lorsque le second cristal a tourné d'un demi-quart de révolution. Dans le cas où les deux rayons sortis du premier cristal traverseraient en même temps un second spath, on observerait pour chacun d'eux les phases décrites plus haut, mais le nombre des rayons émergents serait doublé ; de sorte que dans certaines positions on en aurait quatre et deux seulement dans d'autres.

Polarisation par réflexion et réfraction

Ces propriétés ne sont pas spéciales à la lumière transmise par un cristal,. mais on les constate aussi sur les rayons réfléchis par un miroir de verre non étamé, sous un angle de 36°, et, en général, sur une lame transparente quelconque, inclinée de façon à ce que le rayon réfléchi soit perpendiculaire au rayon réfracté ; on obtient aussi une polarisation plus ou moins complète en faisant passer un rayon, sous une inclinaison déterminée, à travers une pile de lames de verres[1].



Fig. 18.

Dissection des vibrations lumineuses.

Tous ces faits peuvent être rapprochés les uns des autres, et montrent que les rayons ainsi modifiés diffèrent des rayons naturels, en ce qu'ils ne présentent plus de tous côtés les mêmes propriétés ; c'est pourquoi on les a dits *polarisés*. Dans le système des ondes, on a expliqué la différence entre les deux genres de faisceaux, en disant que les vibrations des molécules d'éther se font perpendiculairement à la direction des rayons, et que dans les rayons polarisés tous les mouvements moléculaires sont orientés

[1] On constate facilement tous ces faits à l'aide de l'appareil de Norremberg (fig. 18). — *p*, glace étamée horizontale; *n*, glace non étamée mobile autour d'un axe horizontal. L'angle formé par cette ligne avec la verticale est mesuré sur le cadran *c*; *c*, diaphragme placé dans un anneau gradué sur la circonférence ; *m*, glace de verre noir, convenablement inclinée et fixée au disque *o*, qui peut tourner dans un limbe gradué *i*.

La figure montre comment on obtient un rayon polarisé par réflexion sur la glace *n*. La glace faisant avec la verticale un angle de 36°, on dirige sur cette lame de verre un rayon lumineux faisant 36° avec sa surface ; ce rayon est renvoyé en *p* ; en ce point,

dans une certaine direction et suivent une série de lignes parallèles, tandis que dans les rayons naturels ils sont dirigés dans tous les sens comme les rayons d'une roue[1]. On peut encore faire comprendre cette différence en empruntant une comparaison à l'acoustique. Nous voyons, en effet, les verges vibrantes décrire tantôt une ligne droite, tantôt une ellipse ou un cercle, ou toute autre courbe; de même les atomes de l'éther, dans les rayons polarisés, oscillent suivant des droites parallèles, et dans les rayons naturels suivant des courbes de toute espèce et des lignes droites croisées dans tous les sens. Il a même été possible de reconnaître, par des procédés délicats, les cas dans lesquels les oscillations étaient elliptiques ou circulaires. Nous reviendrons plus tard sur ce point.

Elles sont transversales.

Les phénomènes de la polarisation montrent d'une façon évidente que les vibrations lumineuses doivent être transversales. En effet, si elles étaient longitudinales, la direction d'un miroir, par rapport à l'axe d'un faisceau incident, n'exercerait aucune influence sur la réflexion des rayons, l'angle d'incidence demeurant constant; mais si les vibrations sont transversales, il en sera autrement, car dans une certaine position la surface réfléchissante sera parallèle aux oscillations lumineuses, et alors celles-ci ne frapperont plus avec la composante normale le milieu intérieur, et rebondissant à sa surface avec la plus grande facilité, ne pénétreront pas dans le milieu transparent, tandis que le contraire arrivera si la surface du miroir est perpendiculaire à celle des oscillations; car, rencontrant le milieu normalement, elles pénétreront à l'intérieur.

Fresnel, appliquant aux molécules lumineuses les principes établis en mécanique concernant la composition des mouvements, avec l'application du principe des forces vives, a pu rendre compte de toutes les particularités observées dans la transmission et dans la réflexion de la lumière polarisée. Plus tard, Cauchy, reprenant la question, est arrivé, comme nous l'avons déjà dit, à des

il se réfléchit de bas en haut, traverse la glace *n*, et rencontre le miroir *m* incliné de 36° sur la verticale. Si on fait mouvoir horizontalement le disque *o*, on trouve facilement les deux positions où la glace *m* ne réfléchit pas le rayon *nz*.

La seconde partie de la figure 15 représente comment on modifie l'appareil pour examiner le passage d'un rayon de cristal à travers deux spaths : le premier est placé dans un tube en *e* et le second en *g*. (*Note du traducteur.*)

[1] Le rayon polarisé serait à peu près représenté par cette figure ☰ ou par celle-ci ||||, tandis que le rayon naturel devrait être figuré ainsi ☆.

formules plus générales comprenant celles de Fresnel, et qui, de plus, ont permis d'expliquer les faits observés par d'autres physiciens.

Composition des mouvements polarisés.

Les propriétés des vibrations transversales exigent que si deux rayons polarisés se rencontrent à angle droit, il ne peut y avoir destruction des mouvements ondulatoires, mais alors les molécules prennent un mouvement orbitaire. Ainsi, lorsque deux rayons polarisés ayant des directions rectangulaires se superposent, on n'observe aucun phénomène d'interférence, bien que dans leur marche ils présentent une différence d'une demi-longueur d'onde, et cependant ils sont ainsi dans les conditions voulues pour interférer; de là toute la polarisation chromatique, laquelle nous fournit un moyen pour distinguer les rayons naturels de ceux qui présentent des mouvements suivant des orbites elliptiques ou circulaires : mais pour la démonstration de ces phénomènes nous renvoyons aux traités d'optique.

Conclusions.

Nous nous arrêtons donc aux conclusions suivantes : 1° les ondes lumineuses sont transmises par l'éther sans variation dans la densité de ce milieu; 2° les ondes de la lumière naturelle, au moins à certaine distance du corps lumineux, sont transversales dans les rayons non polarisés ou naturels. Nous ne saurions fournir, il est vrai, aucune preuve directe à l'appui de la dernière proposition, mais nous l'admettons par induction. En effet, si la nature d'un milieu et si les forces qui en sollicitent les atomes sont telles qu'un rayon propagé par ce milieu, après avoir été réfléchi ou réfracté, présente nécessairement un mouvement d'un certain genre, après la réflexion ou la réfraction, cette espèce de vibration doit être toujours la même avant ces modifications étrangères.

Cauchy, cherchant à établir la nature des forces qui devaient être en action dans le milieu éthéré pour produire des ondes transversales, a reconnu que deux hypothèses sont admissibles :

Forces qui produisent ce résultat.

1° donner aux molécules une puissance attractive variant en raison inverse du carré des distances; ou 2° supposer les molécules animées d'une force répulsive réciproquement proportionnelle (au moins dans le cas de molécules peu éloignées du contact) à la quatrième puissance des distances, et même à des puissances plus

élevées. Or, dans cette seconde hypothèse, il ne se produirait pas de dispersion appréciable des couleurs ; aussi peut-on l'appliquer au cas de l'éther libre[1]. Ces résultats sont fondés sur une analyse peut-être un peu approximative ; par conséquent, nous ne voulons pas leur accorder une trop grande importance.

Manière de formation des ondes transversales.

Les vibrations transversales étant admises, essayons d'expliquer le mécanisme de leur formation en nous appuyant simplement sur les propriétés du milieu dans lequel elles se développent, sans recourir aux calculs élevés de la théorie mathématique. Selon Fresnel, la vibration des molécules pesantes produirait, comme effet immédiat, une onde longitudinale ; mais celle ci deviendrait promptement transversale à cause de la résistance de l'éther, attendu que ce fluide, par sa constitution, transmet exclusivement (toujours selon Fresnel) les ondes transversales. Cette manière de voir est juste, mais les explications fournies à l'appui ne sont pas toutes d'une grande clarté à notre avis. Ainsi on compare souvent les ondes transversales de l'éther à celles du même genre qui se forment dans l'eau, dans les verges solides et les lames métalliques ; mais dans ces cas le sens du mouvement ondulatoire s'explique facilement, car il s'accomplit dans la direction de la moindre résistance du liquide ou du solide. Il en est tout autrement pour l'éther fluide homogène, dont la résistance devrait être partout la même.

En réfléchissant sur cette difficulté, il nous est venu à l'esprit une idée que nous exposerons brièvement, car, peut-être convenablement développée, elle fournira des données utiles pour la solution du problème.

Théorie nouvelle proposée.

Jusqu'à présent, toutes les théories proposées en dehors de l'analyse mathématique pour expliquer la propagation des mouvements vibratoires dans les milieux élastiques, l'éther par exemple, ont eu pour base les idées d'Huyghens ; en d'autres termes, on a toujours regardé les molécules d'éther comme des sphères élastiques complétement immobiles, et nous ne savons pas qu'on ait songé à rechercher quelles seraient les lois de la propagation de ces mêmes mouvements si l'on supposait les molé-

[1] Cauchy, *Exercices d'analyse et de physique mathém.*, t. I, p. 289. Briot a trouvé le rapport selon la 6e puissance, comme nous l'avons dit plus haut.

cules animées de rotation, qu'elles soient, du reste, élastiques ou non, dans le sens propre du mot. Or comme rien n'empêche d'étendre à un milieu formé par de telles molécules les propriétés observées dans les cas ordinaires des corps en rotation, il est possible d'expliquer comment les vibrations transversales se développent dans l'éther.

Rotation des atomes éthérées.

La mécanique nous enseigne que si un corps en rotation reçoit un choc suivant le plan de la section principale perpendiculaire à l'axe du mouvement, il se développe un nouvel axe spontané de rotation, et en général le centre de gravité du corps est transporté dans une direction plus ou moins inclinée sur la ligne de percussion. La chose se vérifie aisément en choquant une toupie qui tourne ; elle s'échappe sur le côté. On connaît à ce sujet l'expérience de Marianini ; on met une toupie sur un plan horizontal, et, pendant qu'elle *dort*, on incline le plan du sud au nord, la toupie se meut aussitôt de l'est à l'ouest ; si l'on incline le plan de l'est à l'ouest, elle se meut du sud au nord.

Ainsi la composante de la gravité fait marcher la toupie dans un sens normal à cette composante même. Le phénomène n'a lieu, bien entendu, que si la toupie tourne.

Mais la direction du choc peut être oblique sur la section principale normale à l'axe de rotation ; elle peut même devenir parallèle à ce plan. Alors, outre le déplacement latéral du centre de gravité, il se produira une déviation de l'axe de rotation suivant une loi bien connue dans la théorie des corps tournants, et dont l'énoncé peut se résumer ainsi : « L'axe de rotation devient perpendiculaire au plan passant par sa position initiale et la direction du choc[1]. »

Application de ces principes.

Il résulte de ces principes que si les atomes de l'éther sont en rotation :

1° Lorsqu'ils viendront à s'entre-choquer, non-seulement ils pourront prendre des directions latérales par rapport à celles du

[1] On explique par ce principe : 1° les phénomènes observés à l'aide du gyroscope; 2° comment, en vertu de l'attraction exercée par le soleil et la lune sur la protubérance équatoriale de la terre, l'axe terrestre, au lieu de s'incliner dans le plan de l'écliptique, est dévié de la direction perpendiculaire et décrit un cône autour de cette ligne; une révolution complète de l'axe s'accomplit en 25,000 ans; si notre planète était sans rotation, cette durée serait réduite à 14 ans.

choc, mais cette direction sera nécessaire, et il peut arriver que, pour une vitesse de rotation déterminée, les mouvements longitudinaux deviennent presque complétement impossibles.

2° Dans le mouvement des atomes éthérés, il faut tenir compte du déplacement de leurs axes, qui, se disposant toujours perpendiculairement à la direction de l'impulsion, contribuent puissamment à la propagation de l'ébranlement dans le sens transversal.

Jusqu'ici on avait négligé complétement cette particularité du mouvement qui anime les molécules de l'éther, et, cependant, peut-être pourrait-elle fournir une théorie assez simple des phénomènes de la polarisation; elle me paraît, en effet, concorder avec cette hypothèse de Fresnel, que les oscillations ou vibrations lumineuses sont parallèles au plan de polarisation.

En effet, supposons des atomes éthérés en rotation rencontrent une surface réfléchissante : la percussion devra se décomposer en deux; une normale, l'autre parallèle à la surface. La première se transmettra au milieu; l'autre glissera sur la surface. Si l'atome était sans rotation, en vertu de celle-ci son axe oscillerait dans le plan de réflexion, mais comme il est en rotation, il déviera à angle droit et oscillera perpendiculairement à ce plan de réflexion. L'autre composante transmise étant normale à la précédente produira une oscillation normale, et par là dans le plan de réfraction. Dans les cristaux à double réfraction, l'onde se divise en deux nappes, et on démontre théoriquement que sur ces deux nappes les oscillations sont à angle droit. Explication de la polarisation.

La vibration lumineuse pourrait bien consister en de simples oscillations des axes des atomes éthérés autour de leur centre de gravité sans translation absolue, et par là sans condensation du milieu; mais un de ces monvements n'exclut. pas l'autre. Ces aperçus montrent comment nous comprenons les mouvements transversaux de l'éther. Le choc de la polarisation détermine la direction de l'axe, et par là même la direction de l'oscillation si elle est accompagnée de la translation des atomes éthérés. Il nous paraît que dans cette nouvelle hypothèse toutes les difficultés disparaîtraient, et nous la recommandons à l'attention des mathématiciens. Pour le moment, notre intention n'est pas de renverser les idées reçues; notre remarque a seulement pour but de

montrer que, contrairement à l'opinion de certaines personnes, on ne rencontre aucune difficulté sérieuse à admettre les mouvements transversaux de l'éther. Ainsi la rotation des atomes de l'éther, qui déjà nous avait suffi pour faire comprendre comment-ils peuvent présenter toutes les propriétés des corps élastiques, nous permet encore d'expliquer la direction des vibrations transversales de la lumière.

L'éther n'est pas continu.

Du reste, quelle que soit l'hypothèse adoptée comme base de la théorie des ondes transversales, leur existence démontre à elle seule, avec la dernière évidence, que l'éther est formé d'atomes isolés auxquels on peut appliquer les principes de la composition et de la décomposition des forces fournis par la statique. Aussi, géomètres et physiciens sont-ils d'accord sur ce point, et nous avons vu Cauchy essayer de déterminer par le calcul la distance maximum de deux molécules. Mossotti, après avoir exposé les recherches de Fresnel, dit : « L'existence des vibrations transversales entraîne nécessairement l'hypothèse d'un éther formé par des atomes isolés[1]. » Donc, supposer l'éther continu, à l'exemple de quelques physiciens, est chose inadmissible.

Usages de la lumière polarisée.

Un rayon de lumière polarisé devient un des moyens les plus délicats pour étudier la structure intime des corps, et, suivant l'heureuse expression d'un célèbre écrivain, on peut le comparer à un voyageur qui, ayant parcouru des contrées inconnues, revient au milieu de nous, riche de connaissances dont il nous fait tous profiter. Grâce à la lumière polarisée, on a pu reconnaître : 1° que les solides les plus homogènes en apparence possèdent cependant une grande inégalité de structure; 2° que, contrairement aux conclusions de la mécanique, les liquides sont d'une constitution assez compliquée; 3° elle nous a appris quelle était l'action du magnétisme sur les corps transparents; enfin la lumière polarisée, sortant du laboratoire des physiciens pour entrer dans le domaine de l'industrie, a permis de reconnaître les falsifications de plusieurs substances très-employées[2]. Mais nous laisserons de côté toutes ces questions malgré l'intérêt qui s'y rattache, et nous dirons seulement quelques mots de la structure des métaux.

[1] Mossotti, *Physiq. mathém.*, vol. II, leç. xxviii, p. 324, note.
[2] Tout le monde connaît l'application du polarimètre à l'analyse des sucres

CHAPITRE VIII

DE L'OPACITÉ DES CORPS ET SPÉCIALEMENT DE L'ACTION DES MÉTAUX SUR LA LUMIÈRE.

L'opacité et la transparence ne sont pas des propriétés absolues de la matière ; nulle substance n'est parfaitement transparente, et le corps le plus opaque, pris sous une très-faible épaisseur ou dans un état différent, devient translucide[1]. Ainsi, constamment un certain nombre de rayons sont absorbés par les corps et se transforment, avons-nous dit, en produisant une action chimique ou thermique. Nous pouvons reconnaître plusieurs causes à cette absorption : 1° le frottement de l'onde éthérée passant entre des molécules de forme plus ou moins anguleuse ; 2° le travail nécessaire pour constituer les molécules du corps dans un nouvel état d'équilibre, travail accompli aux dépens de la force vive de l'éther ; 3° la facilité plus ou moins grande des molécules à vibrer à l'unisson de l'onde incidente. Dans le cas où l'unisson est impossible, par la superposition de mouvements ondulatoires de grandeurs différentes, le corps pesant devient souvent le centre d'un nouveau système d'ondes plus longues que les ondes incidentes[2]. Dans ce chapitre, nous étudierons l'absorption par les métaux. **Opacité et Transparence.** **Ses causes.**

Depuis longtemps on a donné comme caractère spécifique des métaux *l'éclat métallique* et une grande opacité ; ces deux propriétés ne dépendent pas d'une irrégularité de structure, comme on le voit pour certaines substances, car elles se retrouvent tout entières dans les métaux parfaitement purs et cristallisés. Plus récemment, après la découverte de la polarisation, on a reconnu que toutes les substances diaphanes présentées à la lumière naturelle sous **Éclat métallique**

[1] Plusieurs métaux fondus (le cuivre par exemple) sont transparents.

[2] Il est bon de rappeler ici une expérience due à Tartini. Lorsque deux cordes dont les sons fondamentaux correspondant à des nombres premiers entre eux, mettent en vibration une troisième corde, celle-ci donne le son fondamental qui lui appartient, quand même ce dernier serait plus grave que les deux autres : chose facile à comprendre si l'on réfléchit à l'incommensurabilité des mouvements excitateurs.

une incidence convenable la polarisent à peu près complétement; avec les métaux, au contraire, on n'obtient jamais qu'un angle de polarisation maximum, car ils polarisent constamment la lumière d'une façon très-incomplète. Ces faits conduisirent les physiciens à admettre dans les métaux une très-grande force réfringente, car on savait que l'angle de polarisation augmente avec ce pouvoir, et on citait le diamant, dont le pouvoir réfringent est considérable et qui polarise très-mal la lumière. La conclusion était prématurée; on peut, en effet, rapprocher l'éclat métallique du brillant phénomène qui nous est offert par un prisme dans l'intérieur duquel un faisceau lumineux subit la *réflexion totale;* et cette considération a donné la clef de la véritable explication de l'action des métaux sur la lumière.

Réflexion totale.

Fresnel, par une intuition que l'on peut appeler effort de génie, a trouvé que dans la réflexion totale la lumière subit une telle modification lorsque le rayon polarisé tombe sous une certaine obliquité et sous un certain azimut sur la face intérieure du prisme; les deux composantes, dans lesquelles se peut résoudre le mouvement, ne sont plus d'accord, mais l'une a subi un retard et elles ont une différence de phase. Ce retard dérive sans doute de l'influence du changement de densité à la surface, limite qui se fait sentir à une petite distance. De là il arrive que le rayon reçoit une polarisation elliptique.

Son analogie avec la réflexion métallique.

Cette différence de phase qui a lieu dans l'intérieur d'un prisme se produit aussi sur une surface métallique, et l'on peut même la rendre très-sensible en faisant subir au rayon plusieurs réflexions successives.

La polarisation elliptique exigeant, pour se manifester, une différence de phase dans les deux composantes principales du rayon réfléchi, il en résulte que toutes deux pénètrent dans l'intérieur de la subtance réfléchissante, mais l'une plus avant que l'autre; d'où résulte pour celle-là un léger retard, par suite une discordance constante entre les phases de ces deux composantes [1].

Polarisation elliptique des métaux.

L'expérience a confirmé ces aperçus théoriques; en effet, les rayons

[1] Pour avoir une ondulation elliptique, il faut : 1° que les deux systèmes d'ondes soient rectangulaires, et 2° que la différence de phase soit comprise entre 0 et $\frac{1}{4}$ d'onde. Pour la valeur $\frac{1}{4}$, l'ellipse devient un cercle; pour les valeurs supérieures, le mouvement elliptique change de sens.

émis par les métaux incandescents sous une grande obliquité sont polarisés par réfraction, et, de plus, les métaux, à la température ordinaire, étant réduits en feuilles assez minces pour se laisser traverser par la lumière, polarisent les rayons avec une telle puissance, que suivant Faraday une feuille d'or est un polarisateur préférable à une pile de glaces ; et tout récemment M. Hempel a reconnu, à l'aide de l'appareil de Norremberg, qu'une très-mince couche d'argent, obtenue par précipitation chimique, polarise circulairement la lumière par réflexion ou par réfraction avec une intensité surprenante. Ces expériences montrent encore la dissemblance des deux composantes principales, car il y a rotation du plan de polarisation du rayon émergent d'une mince feuille d'or, et cette rotation varie avec la nature du métal [1].

Théorie de Cauchy.

Dans sa théorie générale de la lumière polarisée, Cauchy à établi avec une exactitude admirable la relation entre les phénomènes dus à la réflexion et ceux dus à la réfraction ; s'appuyant sur les lois du mouvement vibratoire, il calcula, dans l'hypothèse de la réflexion d'un rayon polarisé sur une surface donnée, la différence de phase des deux composantes principales du rayon polarisé après la réflexion, et il trouva une valeur variable avec la nature de la substance, mais qui ne devenait jamais rigoureusement nulle. De plus, la différence de phase augmente avec l'incidence d'une demi-longueur d'onde à une longueur tout entière, depuis l'incidence normale jusqu'à l'incidence rasante ; mais ce n'est que dans le voisinage de l'angle de polarisation maximum (angle brewstérien) que les variations sont sensibles, et entre deux limites d'autant plus rapprochées, que la lumière est polarisée en plus grande quantité sous l'angle de polarisation maximum ; en dehors de ces limites, la polarisation est *rectiligne*, quoique incomplète ; en dedans elle est elliptique. Ces limites se confondent si la polarisation peut être complète sous un certain angle, alors il n'y a plus de polarisation elliptique, et la différence de phase passe brusquement d'une demi-longueur à une longueur d'onde sous l'angle de polarisation. Avec les métaux, les variations dans

[1] Faraday, *Philos. trans.*, 1857, part. I, p. 148. La rotation du plan de polarisation est un phénomène assez complexe et qui suppose la composition de plusieurs mouvements, ordinairement de deux mouvements hélicoïdaux, l'un dextrorsum, et l'autre sinistrorsum, avec une différence de phase de $\frac{1}{4}$ d'onde. Voyez les traités spéciaux.

la différence de phase sont sensibles depuis l'incidence normale jusqu'à l'incidence rasante. Aussi le rayon réfléchi possède-t-il toujours la polarisation elliptique. Les nombreuses comparaisons faites par M. Jamin entre les résultats de l'expérience et ceux fournis par les formules montrent que celles-ci représentent les phénomènes avec une exactitude remarquable. Ce physicien a reconnu en outre que la connaissance de l'angle de polarisation maximum ne suffisait pas pour calculer la vitesse de la lumière dans les métaux, et, par suite, leur indice de réfraction; de cette manière, on trouvait en effet des valeurs énormes et véritablement exagérées. Ainsi, l'angle de polarisation maximum étant pour l'or 15°, l'indice de ce métal serait 3,79, et pour d'autres métaux les nombres seraient encore plus considérables, de telle sorte que, contrairement aux résultats fournis par les corps transparents, la réfrangibilité augmenterait avec la longueur de l'onde[1]. Mais la théorie nous apprend que l'angle en question est une fonction de deux quantités : une variant avec la vitesse de la lumière, c'est l'indice de réfraction proprement dit; l'autre, dépendant de la résistance offerte par le milieu au passage de la lumière et produisant l'extinction du rayon, a été nommée par Cauchy *coefficient d'extinction*: on doit attribuer à cette dernière action le retard éprouvé par l'une des composantes principales du rayon polarisé, retard qui détermine la polarisation elliptique. L'opacité des métaux est donc en rapport très-étroit avec leur pouvoir réflecteur, et nous devons regarder les substances métalliques comme une classe de corps dans lesquels les vibrations transversales pénètrent seulement à une faible profondeur[2]. Cette impossibilité de faire pénétrer dans les métaux les ondes lumineuses, nous empêche de vérifier si vraiment la réfrangibilité augmente avec la longueur d'onde.

Confirmée par M. Jamin.

Dispersion anormale des métaux.

Pour étrange que cette conclusion puisse paraître, elle serait cependant vraie si les rayons pouvaient traverser un prisme métallique. Mais ce que ne peuvent faire les métaux, peut être produit par certaines substances à l'aspect métallique comme l'aniline et d'autres de ces composés modernes tiré du goudron du gaz d'éclairage. Plusieurs de ces substances en effet, aux reflets métal-

[1] Voy. Billet, *Optique*, t. II, p. 145.
[2] Voy Cauchy, et aussi Billet, t. II, p. 139.

liques très-brillants, dissoutes dans l'eau, donnent un spectre *renversé*. Ces spectres ont été étudiés par Kuhn et Govi et prouvent la vérité des conclusions de Cauchy. Un prisme d'un angle convenable, renfermant ces solutions, donne le spectre avec le rayon rouge plus réfracté que le rayon violet, malgré l'action de l'eau qui tient la substance en dissolution et qui agit en sens contraire. Cette découverte très-intéressante prouve qu'on peut obtenir un rayon sans dispersion, en combinant convenablement des substances dissoutes dans l'eau. Si l'on réussissait à faire un prisme d'un métal fondu qui soit transparent, comme nous avons dit, on aurait un spectre complétement renversé, le violet étant du côté le moins réfrangible.

Ces observations, très-importantes pour nous, établissent nettement la différence entre les milieux transparents et les métaux : les premiers arrêtent les ondes longitudinales, et les seconds les ondes transversales; il devient donc utile de comparer entre elles les principales propriétés de ces substances pour arriver à comprendre comment les ondes transmises par les unes ne le sont pas par les autres. Opposition des métaux et des corps transparents.

Disons tout d'abord que la différence dont nous parlons ne dépend nullement de la nature chimique des corps, mais de la structure moléculaire ; en effet, le charbon, à l'état de graphite et à l'état amorphe, agit de même que les métaux, tandis que, cristallisé, il se range à côté des corps transparents. Nous avons mentionné, il est vrai, que le diamant polarisait imparfaitement la lumière, mais cette particularité dépend de la très-grande intensité de son pouvoir réflecteur. Les mêmes résultats ont été obtenus avec le bore, qui, lui aussi, se présente sous deux formes: l'état graphitoïde et l'état adamantin.

Les expériences de Faraday nous mettent sur la voie de la vérité[1]. Chacun sait que l'or en feuilles très-minces, vu par transmission, présente une belle couleur verte ; l'or chimiquement pur offre la même couleur, mais tirant un peu plus vers le bleu. D'après le physicien anglais, les feuilles ordinaires ont une épaisseur égale au $\frac{1}{5}$ ou au $\frac{1}{6}$ de la longueur d'onde des rayons jaunes. En faisant flotter une de ces feuilles sur une dissolution aqueuse de Transparence de l'or.

[1] Faraday, mémoire cité.

cyanure de potassium, on peut réduire son épaisseur à n'être plus que de $\frac{1}{50}$ de cette même longueur d'onde. Dans ces conditions, la couleur verte de la lumière transmise persiste à se manifester dans tous les points où le microscope n'indique aucune solution de continuité ; ainsi, cette coloration spéciale est due à une véritable absorption. On arrive à la même conclusion en remarquant que ces feuilles, plongées dans le sulfure de carbone pour annihiler l'effet du verre sur lequel elle doivent être appliquées, polarisent la lumière plus énergiquement qu'une lame de verre placée dans l'air. Suivant Faraday, la compression des molécules métalliques exerce une grande influence sur le pouvoir absorbant des métaux. En effet, si on chauffe avec précaution une feuille d'or adhérente à une lame de verre, elle devient transparente, mais la plus légère pression exercée sur sa surface, soit avec le brunissoir, soit même avec l'ongle, suffit pour faire réapparaître la teinte verte.

Effet de la pression sur la couleur.

Transparence des métaux.

Cette propriété n'appartient pas exclusivement à l'or ; on la retrouve également dans l'argent. Les feuilles minces de ce métal laissent passer une lumière violacée ou pourpre ; si on en place un certain nombre dans un tube et si on les chauffe assez fortement, elles prennent une transparence que l'on n'aurait jamais crue appartenir à une substance métallique[1]. Comprimées de nouveau, les lames reprennent l'éclat métallique primitif et présentent une teinte pourpre lorsqu'on le regarde par transmission ; de plus, il est difficile de distinguer la flamme d'une bougie à travers une ou deux de ces feuilles, tandis que lorsqu'elles sont chaudes, quarante ne suffisent pas pour arrêter la lumière. Des phénomènes analogues ont été observés avec les autres métaux réduits en vapeur dans une atmosphère d'hydrogène à l'aide de décharges électriques et précipitées sur des lames de verre. Le platine et le palladium agissent exactement comme l'or ; ils polarisent la lumière et font tourner le plan de polarisation dans le même sens ; de même pour l'étain, le plomb, l'aluminium, l'argent, le rhodium, etc., les sulfures d'antimoine, de mercure, de cuivre, etc. On a aussi reconnu que ces couches ou voiles métalliques, pour être visibles, devaient présenter une certaine épaisseur.

[1] Nous avons dit plus haut que le fer chauffé au rouge est translucide; nous-mêmes avons reconnu qu'un jet de cuivre en fusion est parfaitement transparent.

Travaux de Quinke

Les récentes expériences de M. Quinke ont complété les travaux de Faraday ; il a obtenu par voie chimique des précipités d'argent extrêmement divisés, n'ayant subi aucune compression, et il a vu la lumière se propager au sein de ces précipités avec une plus grande vitesse que dans le vide ; à la moindre compression éprouvée par le précipité, on observait un ralentissement dans la transmission de la lumière[1]. Ce fait est d'accord avec celui que nous avons exposé plus haut relatif au renversement de la réfrangibilité du spectre par les corps métalliques.

Conclusions

De toutes ces expériences, nous devons tirer les deux conclusions suivantes : 1° la lumière pénètre dans les métaux jusqu'à une certaine profondeur, mais elle s'éteint rapidement, si bien que la théorie de Cauchy se trouve confirmée ; 2° les actions mécaniques, telles que la compression, la percussion et l'état de la surface exercent une grande influence sur le pouvoir d'extinction. L'absorption de la lumière par les métaux ne doit pas être entièrement attribuée aux actions mécaniques que le métal a subies pendant sa fabrication, car il s'observe également dans les précipités métalliques ; mais il faut se rappeler que la lumière, en se réfléchissant à la surface d'un métal, éprouve des modifications différentes, suivant le mode de préparation de ce métal.

On se demandera peut-être pourquoi la pression exerce une aussi grande influence sur les propriétés optiques des métaux.

Élasticité imparfaite des métaux

A notre avis, cela résulterait de l'élasticité très-imparfaite de ces corps. Leur limite d'élasticité est facilement dépassée, et alors les molécules ne pouvant revenir à leur position d'équilibre aussi rapidement que l'exige la transmission d'une onde lumineuse, celle-ci s'éteint peu à peu. Dans leur action sur la lumière, les métaux se comportent de même qu'ils le font lorsqu'ils sont soumis à de puissants efforts mécaniques ; ils présentent alors une certaine mobilité de leurs molécules, ils deviennent ductiles, compressibles ; on peut les contourner de mille façons, leur donner des figures diverses. M. Tresca a montré que, sous de fortes pressions, les métaux solides coulent comme des liquides et présentent même le phénomène de la contraction de la veine. Les expériences ont porté non-seulement sur des métaux mous comme le

[1] Moigno, *Mondes*, 1er octobre 1863.

plomb, mais sur le cuivre, le fer, etc. La déformation du métal sera permanente aussitôt que l'on aura dépassé la limite d'élasticité, les molécules ne pouvant plus revenir à leur position primitive. Dans une mince feuille de métal chauffée, les molécules présentent la plus parfaite élasticité dont elles sont susceptibles; mais si cette même plaque est comprimée, la mobilité moléculaire diminue et certains modes de vibration deviennent impossibles; si enfin on dépasse la limite d'élasticité, les molécules ne peuvent plus reprendre exactement leurs positions d'équilibre; alors un certain nombre de vibrations communiquées à la matière s'éteindront peu à peu, et le métal agira comme un milieu coloré. Supposons que le tassement des molécules augmente encore, tous les mouvements vibratoires sont arrêtés, mais la force vive de ces vibrations ne peut s'anéantir, elle devra donc se manifester sous une nouvelle forme dynamique, par exemple sous forme d'un courant électrique ou de chaleur.

Leur mollesse.

Les métaux, surtout à l'état de pureté, se rangent à côté des corps mous; l'expérience la plus ordinaire ne nous apprend-elle pas en effet que, pour présenter une véritable dureté, ils doivent être soumis à des procédés spéciaux de fabrication ou bien encore combinés à quelque substance étrangère; de cette façon, on modifie leur cohésion. Les recherches d'acoustique ont confirmé l'opinion présente; car, dans les métaux (le fer et l'acier exceptés), le son se propage moins vite que dans le verre[1]. Nous sommes donc conduits à dire que les métaux jouissent d'une élasticité très-imparfaite, comparable à celle du liége et des corps souples, mais mous (paille, coton, etc.) pour le son. Ces substances manifestent une élasticité incomplète sous l'influence de pressions un peu énergiques; mais elles étouffent rapidement les vibrations de toute nature à cause de la lenteur avec laquelle leurs molécules reprennent leur position d'équilibre.

Confirmation de cette théorie.

Les expériences de Sénarmont sur la conductibilité calorifique des cristaux viennent à l'appui de notre thèse[2]. D'après ce physi-

[1] Voy. Daguin, t. I, p. 615. — Le fer du commerce n'est jamais pur, et l'acier est un corps composé.

[2] Voici comment M. de Sénarmont (*Annales de ph. et ch.*, IIIe série, t. XXI, p. 656) étudie la conductibilité des cristaux. Supposons, par exemple, deux plaques de quartz taillées l'une parallèlement et l'autre perpendiculairement à l'axe, recou-

cien, les cristaux à axes inégaux transmettent différemment la chaleur : les seuls exemples d'ellipsoïdes thermiques aplatis se trouvent dans les cristaux négatifs (tourmaline, spath d'Islande), et surtout dans ceux qui absorbent le rayon ordinaire ; réciproquement, les ellipsoïdes allongés appartiennent aux cristaux positifs (quartz, glace), et principalement à ceux qui absorbent le rayon extraordinaire.

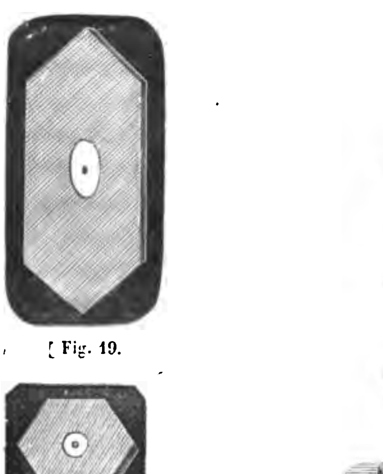


Fig. 19.

Fig. 20.

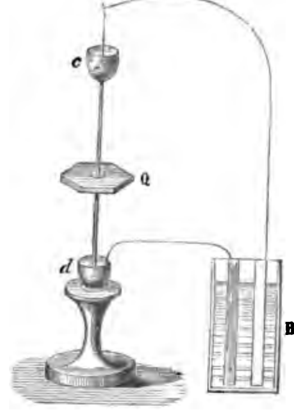


Fig. 21.

Ainsi, le mouvement absorbé correspond toujours à l'axe de moindre élasticité. Donc, une diminution d'élasticité peut rendre un corps transparent incapable de propager les ondes dans une direction donnée.

Ces courbes thermiques, circulaires dans les corps homogènes, deviennent des ellipses lorsqu'on exerce une pression latérale sur

vertes d'une mince couche de cire. Les plaques sont percées au centre, et dans le trou on introduit un fil que l'on fait rougir en le mettant en communication avec les deux pôles d'une pile B, à l'aide du mercure des coupes *c* et *d*. Le corps gras fond tout autour du point où la chaleur est appliquée et forme à la limite de la fusion un bourrelet liquide qui correspond à une *ligne isotherme*. Quand la plaque est refroidie, le bourrelet est encore distinct, et on peut prendre la mesure des divers diamètres de la courbe qu'il dessine. Les courbes obtenues avec le cristal de roche rendent manifeste l'inégalité du pouvoir conducteur dans les différentes directions.

(*Note du traducteur.*)

ces substances, et le petit axe des ellipses est dirigé dans le sens de la compression.

Élasticité dans les liquides.

Pour les liquides connus, ils transmettent les pressions avec la même intensité dans tous les sens ; aussi la propagation des mouvements vibratoires se fait-elle avec une égale facilité dans les divers points de leur masse et ils n'ont pas de double réfraction : de plus, on peut les soumettre aux actions physiques les plus variées et pourvu que leur composition chimique ne change pas, ils conserveront une *intensité spécifique de réfraction*[1] constante. En un mot, aucun d'entre eux ne présente de propriétés comparables à celles des métaux et des cristaux.

Quelques liquides cependant font tourner le plan de polarisation de la lumière, mais c'est là une action propre à la molécule et non à la masse fluide ; aussi se retrouve-t-elle dans la substance prise à l'état de vapeur ; du reste, il est remarquable que les liquides actifs sont tous d'origine organique.

Conclusion finale.

Notre conclusion finale sera donc celle-ci : tout changement survenu dans la densité ou dans l'agrégation moléculaire d'un corps modifie en même temps la facilité avec laquelle les mouvements vibratoires sont transmis par sa masse dans les différentes directions ; et il peut arriver dans certains cas que l'élasticité (ce terme étant employé dans son acception la plus générale, comme il a été dit plus haut) devienne insuffisante pour permettre la propagation du mouvement, d'où l'opacité complète ou partielle de certaines substances.

Parallèle entre les métaux et les corps diaphanes.

Il est nécessaire ici de mettre en parallèle les propriétés des corps diaphanes et celles des métaux, car cette comparaison fera saillir en pleine lumière leur complète discordance.

1° Tous les corps métalliques sont conducteurs de l'électricité et du calorique ; les corps transparents, au contraire, sont idiolectriques, isolants et très-mauvais conducteurs de la chaleur.

2° Dans les corps métalliques, les molécules peuvent être dérangées de leur situation d'équilibre, et même dans des limites assez étendues sans briser leur liaison et leur continuité ; de plus, elles demeurent d'une façon permanente dans les nouvelles

[1] Moigno, *Mondes*, science pure, 23 novembre 1863, p. 680.

positions qu'on leur a fait occuper; il y a quelques exceptions, l'acier trempé, par exemple; mais alors interviennent des influences étrangères. Dans les corps transparents, au contraire, les déplacements moléculaires sont seulement possibles dans des limites excessivement restreintes, et si on parvient à maintenir les molécules dans un état forcé, au moindre effort le corps se brise; donc, d'une manière générale, leur élasticité est plus parfaite, bien que moins développée; aussi ne sont-ils ni ductiles ni malléables.

3° Les corps métalliques sont opaques, à moins qu'ils ne soient en lames très-minces; les corps non métalliques sont généralement transparents quand ils sont parfaitement purs. Si quelques-uns de ces derniers sont opaques, cela résulte de ce qu'ils agissent à la façon des métaux sur certains rayons; ainsi, dans les cristaux, cet effet est dû, comme nous l'avons vu, à l'élasticité qui n'est pas égale dans toutes les directions. Le fer oligiste, la carthamine, présentent l'opacité métallique pour certains rayons et sont parfaitement transparents pour d'autres, preuve évidente que l'absorption de la lumière par un corps ne dépend pas de sa nature chimique, mais de sa structure moléculaire. Ajoutons encore que par réflexion les métaux polarisent la lumière en ellipses assez larges et les corps transparents en ellipses très-étroites.

En résumé, nous voyons que les vibrations transversales peuvent s'éteindre en traversant un milieu parfaitement perméable aux mouvements d'une autre nature, et que ces différences sont dues à la disposition moléculaire. Tel mode d'agrégation des atomes produit une substance diaphane, et tel autre la rend opaque : la première sera isolante, la seconde conductrice.

Questions. 1° Transformation des vibrations.

Deux questions se présentent naturellement ici : 1° en quel genre de mouvement se transforme la vibration lorsqu'elle est absorbée? se transforme-t-elle en chaleur, c'est-à-dire en mouvement de la matière pondérable, ou bien en une autre espèce de vibration? La réponse n'est pas difficile : d'abord il est hors de doute que le mouvement ne s'anéantit pas, l'observation journalière nous le prouve; un métal exposé au soleil ne s'échauffe-t-il pas fortement; par contre, dans les mêmes conditions, la température des corps transparents varie à peine. De plus, dans les

métaux, il se produit un autre genre de mouvement intérieur, le mouvement électrique, sur lequel nous insisterons plus tard.

2° Origine de la qualité métallique.

2° Pourquoi les propriétés des métaux sont-elles si opposées à celles appartenant aux corps diaphanes? Sur ce point, les conjectures seules sont possibles. Qu'il nous soit donc permis de soumettre à l'appréciation du lecteur les quelques aperçus suivants. En étudiant les formes cristallines des métaux, on les a trouvées toutes voisines du cube; d'où l'on pourrait conclure que leurs atomes sont très-probablement sphériques, ou peu s'en faut. D'une manière plus générale, leurs moments d'inertie présentent une égalité parfaite ou assez près d'être parfaite. Dès lors les molécules, dans l'intérieur des masses métalliques, seront d'une grande mobilité et pourront facilement obéir aux moindres impulsions; par conséquent, en se déplaçant pour occuper de nouvelles positions pendant un temps plus ou moins longs, elles absorberont la majeure partie de la force vive communiquée à ces masses. Inversement dans les corps diaphanes (qui, pour la plupart, sont des corps composés), les molécules, primitives ayant leurs axes d'inertie assez inégaux, sont moins facilement écartées de leurs positions d'équilibre pendant la transmission d'un mouvement à travers leur substance. Donc, ces mouvements passeront facilement en contournant les molécules[1]. Ainsi voyons-nous les ondes développées à la surface de l'eau s'éteindre au contact des corps mous et flexibles, et si par contre un corps dur se présente, elles le contournent et continuent leur progression.

On peut donc ajouter aux causes d'absorption de la lumière l'imparfaite élasticité des substances métalliques qui empêche la propagation du mouvement dans leur intérieur.

[1] On pourrait citer des exceptions, nous le savons. Ainsi, le chlorure de sodium, l'alun, le diamant, ont des axes égaux; mais nous proposons des hypothèses et non des démonstrations; encore faut-il dire que ces corps (le diamant excepté) sont composés, et dès lors il peut arriver que, par une compensation de formes élémentaires bien différentes, il résulte cette forme à axes égaux et orthogonaux.

CHAPITRE IX

DE LA PROPAGATION DE LA LUMIÈRE DANS LES MILIEUX SOLIDES AYANT UNE ÉLASTICITÉ NON UNIFORME. — DE LA DOUBLE RÉFRACTION.

Dans les questions d'optique, la plus grande difficulté du sujet résulte de ce que la nature de l'éther nous étant inconnue, nous devons déduire ses propriétés de l'étude des phénomènes mêmes dont nous cherchons l'explication. On comprend dès lors pourquoi nous sommes forcés de recourir à de fréquentes hypothèses, puis il nous faut justifier *a posteriori* les principes admis en constatant l'exactitude des conséquences auxquelles ils nous conduisent; cependant, comme un même fait peut recevoir plusieurs explications, il reste toujours une certaine obscurité dans les théories. Ces réflexions sont surtout applicables à l'objet de ce paragraphe, dans lequel nous aurons à tenir compte simultanément de l'action de la matière pondérable et de l'influence des agents impondérables. **Difficultés en optique.**

Nous allons traiter de la double réfraction, phénomène dans lequel la constitution de la matière pondérable a une énorme influence. D'après les physiciens les plus éminents, les deux rayons en lesquels se partage un faisceau lumineux lors de son passage au travers de certains cristaux, ou tout au moins l'un des deux seulement est soumis à l'influence du milieu. Cette action ne doit pas nous étonner, car si la matière pesante ne conduit pas directement l'ondulation lumineuse, comme nous l'avons montré plus haut, il est certain, avons-nous ajouté, que la densité et la structure du milieu traversé par l'onde exerce sur elle une grande influence. **Influence des milieux.**

Jusqu'ici, nous avons toujours supposé les milieux de densité uniforme; il nous reste à considérer maintenant ceux dont la densité ne reste pas la même dans les trois dimensions. Mais, avant tout, il faut définir ce que l'on doit entendre par *élasticité* et par *corps homogène :* nous prendrons pour guide l'auteur de la

Théorie mathématique de l'élasticité des corps solides déjà cité maintes fois.

Définition de l'homogénéité.

La définition générale de l'élasticité ayant été donnée plusieurs fois ci-dessus, nous n'y revenons pas, et il nous suffit de faire comprendre actuellement quels sont les caractères d'un corps homogène. On entend par corps homogènes ceux dans lesquels une ligne droite L, de longueur appréciable et de direction déterminée, traverse le même nombre n de systèmes moléculaires, en quelque endroit qu'elle soit placée, quand elle se meut *parallèlement* à elle-même. Le rapport $\frac{L}{n}$ peut d'ailleurs varier avec la direction de la droite L, mais il est constant pour toutes les directions parallèles. La géométrie nous apprend que dans ces corps : 1° on peut toujours trouver trois directions rectangulaires correspondant, la première, à la valeur maximum de l'élasticité; la seconde à sa valeur minimum, et la troisième à sa valeur moyenne; 2° que si, prenant trois axes rectangulaires, dont les longueurs soient proportionnelles à ces valeurs, on construit un ellipsoïde sur ces trois droites; un demi-diamètre du solide obtenu tracé dans une direction quelconque représentera la valeur de l'élasticité dans cette direction; aussi a-t-on appelé ce solide *ellipsoïde d'élasticité*.

Ellipsoïde d'élasticité.

Lois de propagation du mouvement dans un milieu à inégale élasticité.

Si l'élasticité n'est pas la même dans toutes les directions, le calcul prouve que tout mouvement ondulatoire, en se propageant dans le milieu, présente les particularités suivantes :

1° Lorsque l'éther est ébranlé par un centre unique, les vibrations sont transversales et se trouvent séparées en deux mouvements perpendiculaires l'un à l'autre.

2° Ces deux mouvements se propagent avec une vitesse inégale dans les diverses directions, et chacun se propage sur une nappe particulière : l'ensemble des deux nappes constitue la surface de l'onde.

3° A chaque système de nappes élémentaires correspond une surface enveloppante distincte, et de cette façon, pour un seul rayon incident, on a deux rayons émergents.

4° Les deux rayons sont polarisés perpendiculairement l'un à l'autre. Dans les cristaux à un axe, l'ordinaire est polarisé suivant la section principale, et l'extraordinaire normalement à celle-ci.

5° En examinant maintenant les phénomènes sous le rapport du *temps*, on reconnaît qu'un même point du cristal reçoit deux ébranlements à deux époques distinctes : le premier lui est apporté par le mouvement le plus rapide et le second par celui dont la vitesse est moindre ; il y a exception seulement pour les points où les deux ondes élémentaires se confondent en une seule.

Toutes ces propositions découlent de la théorie mathématique de l'élasticité ; de plus, leur exactitude a été contrôlée par l'expérience. Comme elles sont d'une très-grande importance, nous essayerons de les rendre aussi intelligibles que possible aux personnes peu familiarisées avec l'analyse géométrique. Et d'abord la propagation de la lumière dans les cristaux biréfringents étant un cas particulier de la théorie générale de la transmission des mouvements vibratoires par les milieux à élasticité inégale dans les diverses directions, il est bon de prévenir le lecteur que nous accepterons sans démonstration certaines données du calcul, suivant en cela l'exemple fourni par la mécanique céleste lorsqu'elle emprunte à la géométrie les principes relatifs aux forces qui régissent les astres.

1° Pour nous faire une idée d'un milieu ayant une élasticité variable suivant les trois dimensions, examinons un parallélipipède de bois taillé dans le sens des fibres ; ce solide ne présente pas la même élasticité suivant la longueur (sens des fibres) et suivant la largeur. De plus, sur une section droite du solide, l'élasticité est différente dans la direction parallèle et dans la direction perpendiculaire aux couches ligneuses. Donc, un mouvement vibratoire communiqué à cette verge ne pourra se propager dans toutes les directions avec une égale vitesse. Pour déterminer rigoureusement comment les choses se passeront, il est nécessaire de recourir au calcul ; toutefois il est permis d'affirmer *a priori* que la vitesse de propagation, variant suivant les trois axes d'élasticité, sera profondément modifiée dans ces trois directions.

Exemple d'un milieu à inégale élasticité.

En effet, comme les vibrations sont transversales, elles mettent en jeu les composantes de l'élasticité du milieu suivant deux directions seulement à la fois, la troisième composante n'intervient en rien.

Supposons pour fixer les idées les vibrations moléculaires s'ac-

Développement des mouvements.

complissant et se propageant dans un plan horizontal parallèlement aux lignes A☰A′, évidemment deux genres d'élasticité concourent à leur production : d'abord l'élasticité AA′, ensuite celle de la direction perpendiculaire au plan de la figure. Cette dernière sert à la propagation du mouvement, couche par couche, suivant la longueur de la verge; mais l'élasticité de la direction perpendiculaire à la ligne AA′, c'est à-dire selon le sens vertical, n'exercera aucune influence sur les vibrations transversales, car d'après la définition des corps homogènes, dans tous les plans parallèles au plan d'oscillation considéré, l'élasticité conserve une valeur constante. Les mêmes raisonnements sont applicables aux mouvements verticaux |||| $\frac{C}{C}$ qui mettent à profit l'élasticité dans le sens vertical et la mobilité suivant la longueur. Donc, en général, dans les vibrations transversales, seront utilisées seulement l'élasticité parallèle à l'excursion moléculaire et la mobilité du milieu dans le sens de la propagation du rayon.

Il résulte de ces considérations que, dans les milieux à trois axes d'élasticité inégaux, les ébranlements doivent se propager avec une vitesse différente dans deux plans rectangulaires, si les directions des mouvements font entre elles un angle droit. Alors il peut se présenter deux cas : 1° le rayon se propage suivant un axe d'élasticité ; 2° ou il est incliné sur cet axe.

Rayons selon les axes.

1° Dans le premier cas, le rayon se propageant suivant un des trois axes, les oscillations sont parallèles aux deux autres : AB et CD : par exemple, dans la figure ci-jointe ; le premier système d'oscillation mettant à profit la mobilité du milieu dans la direction normale au plan de la figure, et parallèlement à AB ; seulement il ne sera troublé en rien par les oscillations du second système, qui se propagent en mettant à profit l'élasticité suivant CD. Les deux genres de mouvements vibratoires coexisteront donc avec des

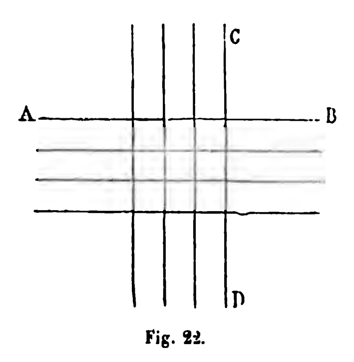


Fig. 22.

vitesses indépendantes l'une de l'autre, de telle sorte qu'un point *k* placé à une certaine distance du centre *o* recevra deux ébranlements successifs *m* et *n*, l'un par le fait des oscillations sui-

m *n*
o *k*

vant AB, et l'autre par le fait de celles suivant CD. Mais dans ce cas la surface tangente aux ondes élémentaires est perpendiculaire à l'axe ; aussi le rayon ne présentera aucun dédoublement apparent si la face d'émergence est parallèle à celle d'incidence. Au contraire, dans le cas où les deux faces font entre elles un certain angle, la différence entre les vitesses deviendra manifeste et le rayon se divisera en deux autres.

2° Si le rayon est incliné sur les axes, un des deux mouvements suit l'axe de moindre résistance, et l'autre une direction perpendiculaire à cet axe. Ces deux mouvements coexisteront sans s'influencer réciproquement, mais les plans tangents à l'ellipsoïde étant dans ce cas inclinés sur le diamètre suivi par le mouvement dans sa propagation, les surfaces tangentes aux ondes font entre elles un certain angle et le rayon se dédouble. Il faut excepter cependant le cas d'un mouvement dans une direction perpendiculaire à la section circulaire de l'ellipsoïde, surface dans laquelle, l'élasticité transversale étant égale dans tous les sens, les rayons lumineux ne subissent aucune bifurcation. Dans cette section se trouvent les axes optiques dont la direction dépend de la longueur de l'onde transmise ; or cette longueur est très-variable, voilà pourquoi on observe alors un phénomène comparable à celui de la dispersion. Rayons obliques.

Plusieurs personnes trouvent difficile à admettre comment un mouvement unique, le mouvement de la lumière naturelle, par exemple, peut donner lieu à des mouvements disposés comme il a été dit plus haut lorsqu'il traverse un cristal[1].

[1] Si la lumière consistait exclusivement en mouvements oscillatoires des atomes éthérés autour de leur centre de rotation, les choses s'expliqueraient plus facilement, car on pourrait assimiler les atomes à autant de gyroscopes, tous orientés d'une manière uniforme ; or, supposant l'un d'eux heurté suivant son équateur, il prendra un mouvement oscillatoire polaire normal à la direction du choc, et dans son mouvement de balancement, il choquera à son tour les atomes voisins, d'où oscillation polaire d

Comparaison dans les corps sonores.

Pour éclairer ce point délicat, nous rappellerons certains phénomènes plus faciles à observer qui nous sont offerts par les corps sonores, formés de solides à trois axes d'élasticité inégaux. En frottant avec un archet une verge à section rectangulaire, on détermine facilement des vibrations dans le sens de la moindre résistance ; on réussit, mais avec peine, à obtenir des vibrations suivant une autre direction, avec une verge dont la section normale est un rectangle très-voisin du carré ; on observe alors des lignes nodales spirales assez compliquées. Mais si au lieu d'une simple verge dont les molécules étroitement liées entre elles se prêtent difficilement à la propagation d'un double mouvement, on prend deux verges d'une faible épaisseur, taillées suivant des plans perpendiculaires, complétement distinctes l'une de l'autre et encastrées sur une certaine partie de leur longueur dans une verge mise directement en vibration avec un archet, ces deux tiges vibreront chacune d'une manière indépendante et chacune avec le ton qui lui est propre, de plus, si elles ne sont pas faites de la même matière ; elles propageront le mouvement avec des vitesses différentes. Semblable chose peut arriver pour l'éther lorsqu'une vibration pénètre dans un cristal. L'éther intra-moléculaire n'a pas une densité égale dans tous les sens, mais en sa qualité de fluide mobile, ses atomes peuvent se déplacer indépendamment les uns des autres. Un des mouvements se propagera dans le sens de la moindre résistance, et, par suite, dans le plan nommé section principale ; l'autre sera perpendiculaire au premier. On demandera peut-être pourquoi les directions de ces deux mouvements font constamment un angle droit. Ce fait dépend de cette double considération théorique : 1° qu'un mouvement quelconque est toujours décomposable suivant deux directions perpendiculaires ; 2° que si deux mouvements sont rectangulaires, alors seulement la vitesse de l'un n'est pas influencée par celle de l'autre.

Direction du rayon.

Reste à fixer la direction des rayons : ici il ne faut pas con-

ces derniers dans une direction perpendiculaire à celle du choc, et par suite parallèle à celle de la percussion qui avait troublé les rotations de l'atome considéré en premier lieu. De cette manière, on aurait deux systèmes de mouvements oscillatoires, s'effectuant dans des directions rectangulaires et se propageant chacun avec une vitesse particulière qui serait fonction composée de la résistance du milieu et de la distance réciproque des atomes plus ou moins grande dans les diverses directions.

fondre la propagation d'une *onde élémentaire* avec celle de l'onde proprement dite, c'est-à-dire de la surface tangente à toutes les ondes élémentaires, véritable enveloppe de ces mêmes ondes, cette dernière seule donne la direction du *rayon lumineux*.

Forme de l'onde.

Il était réservé à la géométrie de résoudre cette question, et elle a montré que l'onde était une surface du quatrième degré à deux nappes ; de plus, ces deux nappes se coupent de manière à donner naissance à des points particuliers nommés *ombilics*, points auxquels la surface présente des dépressions comparables à celle d'un coussin capitonné. On a constaté expérimentalement sur les cristaux l'existence des curieux phénomènes de la réfraction conique dans les points où l'analyse mathématique indiquait la présence de ces ombilics, et ce résultat doit être regardé comme une éclatante confirmation du système des ondulations.

Cas spécial.

Si la surface d'élasticité est un ellipsoïde de révolution autour d'un de ses axes, la figure de l'onde devient celle d'une sphère ou d'un ellipsoïde de révolution ; tel est le cas des cristaux à un axe, le spath d'Islande, la glace, etc. L'ellipsoïde peut être raccourci ou allongé, de là les cristaux positifs ou négatifs. Enfin cet ellipsoïde d'élasticité n'est pas une pure fiction géométrique ; son existence est rendue évidente par les courbes thermiques et les lignes nodales observées sur les lamelles cristallines mises en vibration.

Comment on détermine la direction du rayon.

La direction du rayon lumineux, dans les corps biréfringents, s'obtient à l'aide de la construction donnée par Huyghens et fondée sur le principe énoncé plus haut. On considère chacun des points de l'onde précédente comme un centre d'ébranlement pour l'onde suivante ; seulement dans un milieu uniforme un ébranlement quelconque donnerait toujours une onde sphérique. Au contraire, dans le cas présent, l'onde élémentaire appartiendra à l'une ou à l'autre des deux nappes de la surface de l'onde, ensuite on trace une surface tangente à toutes ces ondes élémentaires, et une normale à cette surface représente le rayon lumineux. La construction précédente peut et doit être faite pour chacun des points du cristal d'après la définition de l'homogénéité. Dans ces substances, un axe d'élasticité est une direction et non une simple ligne droite. Donc, en chacun des points du cristal, on peut toujours concevoir

l'ellipsoïde d'élasticité disposé de manière à représenter l'élasticité du milieu, et le même point est aussi le centre de la surface de l'onde.

Ce rapide aperçu est nécessairement un peu obscur vu la difficulté du sujet; il permet cependant de se représenter comment on conçoit les mouvements lumineux dans l'intérieur des milieux à trois axes inégaux sans entrer dans le détail de la théorie mathématique de la double réfraction, théorie très-difficile, mais dont toutes les parties fondamentales sont parfaitement établies; car si quelques points présentent encore un peu d'obscurité, on doit reconnaître qu'ils sont tout à fait secondaires et ne peuvent infirmer en rien la validité des principes.

Origine mécanique d'une telle disposition.

L'étude que nous venons de faire de la double réfraction avait pour but de montrer que toute la théorie de ces phénomènes repose sur la possibilité de représenter la valeur de l'élasticité dans divers sens par un ellipsoïde dont le rayon vecteur a toujours une longueur proportionnelle au nombre des systèmes moléculaires que rencontrerait par un rayon lumineux suivant la direction de cette ligne. On suppose, bien entendu, le milieu tel qu'une droite donnée rencontre toujours le même nombre de molécules en se déplaçant parallèlement à elle-même, quelle que soit sa direction primitive. Or on peut admettre comme évident que la matière est distribuée de façon à remplir cette condition dans les solides si leurs molécules présentent une orientation commune, si par exemple les axes de rotation de chacune d'elles sont dirigées dans un même sens. La cause déterminante d'une semblable direction n'est pas difficile à comprendre lorsqu'on se rappelle que dans un solide les molécules sont suspendues au sein d'un fluide, car tous les corps animés de rotation continue tendent, en s'entre-choquant, à prendre des directions parallèles. On pourrait supposer une pareille orientation dans l'éther, mais cela n'est pas nécessaire, puisque celle des molécules pesantes détermine un régime particulier des atomes éthérés qui à lui seul explique parfaitement pourquoi la lumière se propage avec une inégale vitesse dans les diverses directions. Où la matière pondérable est dense, la vitesse de transmission est minimum, car l'éther est moins libre et moins mobile, son inertie augmentant à mesure que le nombre

des atomes matériels suspendus dans ce fluide devient plus grand.

Il reste beaucoup de choses à dire sur la propagation de la lumière dans les corps, mais nous renvoyons aux traités spéciaux. Une chose intéressante, les mouvements orbitaires des atomes sera discutée lorsque nous parlerons du magnétisme. Il existe une relation très-curieuse entre ces deux classes de phénomènes, de sorte que des savants très-éminents ont renfermé dans la même classe de mouvement l'optique et le magnétisme : nous devons donc nous réserver dans le livre suivant.

Relation l'optique avec le magnétisme

Assurément toutes ces questions sont ardues : la matière se présente à l'observateur sous un aspect nouveau et étrange. Les corps solides les plus résistants n'ont plus de liens rigides comme on l'imaginait autrefois et tout se réduit à un équilibre dynamique dans une masse entièrement mobile et un mouvement effectif. De là des difficultés nombreuses, rendues encore plus grandes parce que l'analyse mathématique se trouve embarrassée à relier les rapports qui existent entre un grand nombre de faits fournis par l'observation. Mais l'histoire de la science nous montre comment, dans les divers problèmes de la philosophie naturelle, de vastes lacunes se sont comblées peu à peu, et ces exemples nous autorisent à croire qu'il en sera de même pour la théorie dynamique de la lumière. Ajoutons que, dans le système établi en dehors de l'hypothèse éthérée, non-seulement il a été impossible de donner une explication satisfaisante de l'optique supérieure, mais encore toute tentative sérieuse faite de ce côté a échoué. Ainsi l'influence de la matière pondérable sur la densité de l'éther est aujourd'hui un fait acquis à la science, mais la seule présence de cette matière ne suffit pas pour expliquer les phénomènes lumineux et il faut admettre la présence de l'éther.

Impuissance du système de l'émission

CHAPITRE X

CONCLUSIONS GÉNÉRALES DE CE LIVRE.

Dans cette étude des phénomènes lumineux, notre but a été de rechercher en quoi consiste cette force qui non-seulement, par l'intermédiaire de l'œil, nous met en relation avec le monde exté-

But proposé.

rieur, mais encore vivifie la nature par son influence thermique et la modifie sans cesse par ses propriétés chimiques. Les faits nous ont appris que cette triple action de la lumière se réduisait à des *modes de mouvement d'une certaine substance;* puis pénétrant plus avant dans la question, nous avons reconnu que ce mouvement était une vibration analogue à celle des milieux élastiques. Alors s'est présentée la question de savoir si ces vibrations sont transmises par la matière pesante elle-même; mais cette hypothèse ayant été reconnue inadmissible, nous sommes arrivé à admettre l'existence d'un milieu impondérable répandu dans tout l'univers, imprégnant tous les corps et servant à la transmission des radiations lumineuses calorifiques et chimiques.

Faits acquis.

Imperfection restante.

Cette vaste théorie présente encore quelques points incomplétement examinés. Ainsi les relations des mouvements de la matière pesante avec ceux de l'éther ont été entrevus bien plutôt que nettement déterminés et encore moins démontrés. Mais, si nous réfléchissons aux difficultés sans nombre dont il a fallu se rendre maître pour résoudre le problème du mouvement des corps célestes, problème très-simple relativement à la question présente, nous reconnaîtrons que c'est chose difficile de trouver par le calcul la loi des phénomènes fournis par l'observation de la nature. La mécanique céleste a ses perturbations et ses incertitudes, la mécanique moléculaire a aussi les siennes; elles sont même plus nombreuses. Nous citerons, par exemple, les phénomènes de la dispersion chromatique, la position variable des axes optiques dans les cristaux suivant la longueur des ondes et les doutes que l'on peut avoir sur la direction du mouvement des molécules par rapport au rayon[1]. Or, malgré les perturbations constatées dans

[1] Voyez Lamé, p. 329. D'après Fresnel, les vibrations s'accompliraient à la surface de l'onde suivant des courbes ellipsoïdales et non suivant des courbes sphériques, ce qui revient à dire qu'elles seraient parallèles à la projection du rayon lumineux sur l'onde plane tangente à la surface, et non perpendiculaire au rayon, comme le veut la théorie de Lamé. Dans les deux hypothèses, la forme de l'onde est la même, et les rayons sont polarisés à angle droit; aussi l'expérience n'est d'aucun secours pour décider entre elles. Cauchy, dont les formules sont plus générales que celles de Lamé, est arrivé à une conclusion conforme à celle de Fresnel. Un autre point est encore incertain : les vibrations, dans les rayons polarisés, sont-elles perpendiculaires ou parallèles au plan de polarisation? Quinke regarde la seconde proposition comme démontrée, mais la plupart des autres physiciens sont d'un avis contraire.

les mouvements des astres, on a admis la gravité, il est donc permis d'en user de même à l'égard de la théorie de l'éther.

Dans ce livre, à côté de propositions parfaitement démontrées se trouvent de simples conjectures livrées par nous à l'appréciation du lecteur. Au nombre des propositions certaines nous pouvons citer les suivantes : La lumière se propage par la vibration d'un milieu ; ce milieu n'est pas la matière pesante, car dans cette hypothèse, lorsqu'on communique à la matière un mouvement très-rapide, la vitesse de la lumière devrait augmenter ; et il n'en est rien. Cela posé, nous admettons l'éther, fluide matériel impondérable. Propositions certaines.

De plus, nous proposons quelques conjectures sur la structure intime des corps, à l'aide desquelles toute espèce de force abstraite imaginée jusqu'ici pour expliquer la cohésion des corps devient inutile. Propositions probables.

Ces idées, nous le prévoyons bien, rencontreront une grande opposition parmi les partisans des anciennes théories ; à leur sens, pour expliquer la constitution d'un corps, la matière et le mouvement ne suffisent pas. Désireux d'éviter toute équivoque, nous répéterons encore que nous ne nions pas l'existence des forces ; nous essayons seulement de les expliquer à l'aide des propriétés d'un milieu dont l'existence est irrécusable, et de les ramener à des modes de mouvement. Ainsi, jadis la théorie de certains phénomènes reposait sur l'horreur du vide qui alors était une force, aujourd'hui ces phénomènes sont classés parmi les effets de la pression atmosphérique ; de même, au moyen de l'éther, notre système permet d'expliquer un grand nombre de faits attribués jusqu'ici à des forces mystérieuses. Admission des forces.

Nous émettons nos opinions avec toutes les réserves possibles ; il est juste cependant d'ajouter que déjà ces idées théoriques sont acceptées par un grand nombre de physiciens[1]. Hypothèse des rotations atomiques.

Nous avons vu que les vibrations sont transversales au rayon, et en cela l'expérience est d'accord avec la théorie ; cherchant alors

[1] Nous citons volontiers les noms d'auteurs, d'abord par justice, et ensuite pour faire voir que bon nombre des explications proposées ne nous sont pas personnelles. Au reste, nous disons avec Galilée (*Saggiatore*) qu'il est très-malheureux de ne pouvoir traiter une question scientifique sans s'appuyer sur les idées des autres, et non sur l'observation de la nature.

une explication physique de ce fait, nous avons indiqué comment au point de vue mécanique la direction transversale des vibrations pouvait être regardée comme un effet du mouvement rotatoire des atomes. Dans les vibrations transversales, il n'y a pas changement de densité du milieu. On ne peut cependant se refuser à admettre la possibilité des vibrations longitudinales ; les mathématiciens ont trouvé que ces vibrations existent, mais qu'elles ne se manifestent pas comme radiations. Toujours est-il qu'elles jouent un certain rôle dans l'économie de la nature. Lequel? Jusqu'à présent les conjectures seules sont possibles sur ce point ; les uns soutiennent qu'elles produisent le calorique, opinion inadmissible, puisque la chaleur rayonnante se polarise ; d'autres leur attribuent les phénomènes de la gravité[1]. Ce sujet sera traité en temps convenable.

Tourbillons moléculaires.

De même que la direction transversale des vibrations de l'éther est une conséquence de la rotation dont les atomes sont animés, ainsi la rotation des atomes matériels nous explique pourquoi dans les cristaux biréfringents l'élasticité n'est pas la même dans toutes les directions. En effet, la comparaison des faits nous a conduit à admettre une orientation spéciale des molécules des corps, un parallélisme de leurs axes de rotation duquel résulte une distribution différente de l'éther dans les diverses directions de la masse.

La rotation des molécules détermine au sein de l'éther des changements de densité, car ce fluide autour de chacune d'elles est entraîné dans un mouvement de giration et forme des espèces de tourbillons. Selon toutes probabilités, cette inégalité de la densité de l'éther est la cause de la dispersion prismatique et des variations observées dans la position des axes optiques des cristaux biréfringents lorsqu'ils sont traversés par les divers rayons colorés. La direction des axes est profondément modifiée par l'influence de la chaleur[2], preuve évidente que la vibration propre à la molécule pesante, joue un certain rôle dans ces phénomènes.

Particularités des corps métalliques.

Les mouvements de rotation ne paraissent pas avoir le même de-

[1] Voyez Keller, *Comptes rendus*, 1865. — Challis, *Cosmos*, 4 décembre 1863.

[2] Dans les cristaux de sulfate de chaux, la direction des axes de positive devient négative sous l'influence d'une légère variation de température et change en présentant des couleurs variées

gré de stabilité dans tous les corps ; ils sont probablement plus faciles à troubler dans les métaux et les corps simples dont les molécules ont une structure peu compliquée et une forme polyédrique simple. Vu notre complète ignorance relativement à la constitution de l'éther et de la matière pesante, nous devons nous borner à ces quelques observations. Toutefois le fait de l'absorption de la lumière par les métaux nous apprend que l'on doit rapporter à une cause commune, savoir leur élasticité imparfaite, et la propriété dont jouissent ces substances de subir des déformations permanentes sous l'influence des actions mécaniques et celle d'éteindre le mouvement vibratoire et de ne le laisser pénétrer qu'à une faible profondeur.

L'éther n'est pas un gaz.

L'observation est impuissante à nous faire connaître la nature de l'éther ; cependant elle nous montre que ce n'est point un gaz et que ses atomes sont beaucoup plus rapprochés que les molécules des corps pesants ; en même temps elle met en évidence le rôle important du milieu universel dans la théorie des phénomènes physiques. L'esprit se refuse à regarder l'éther comme un milieu *exclusivement destiné à vibrer*, et, lorsque nous voyons les corps animés de mouvements vibratoires produire les effets les plus variés, il nous est impossible de ne point tenter une explication des forces de la création fondée sur les propriétés de ce milieu. En optique, le système des ondes a fait disparaître les innombrables forces dont la théorie newtonnienne dotait tous les corps ; ainsi la théorie complète de l'influence mécanique de l'éther permettra de supprimer de la science un nombre considérable de forces admises jusqu'à ce jour pour expliquer les phénomènes. Bien plus, en voyant les efforts de nombreux et illustres savants, il n'est point téméraire d'espérer que la puissante famille des attractions et des répulsions qui à présent règne sur toute la physique (comme les divinités de l'Olympe moderne, dirait M. Émile Martin) ne tardera pas à être détrônée, car nous entrevoyons la possibilité de rattacher à la présence de l'éther les actions moléculaires et chimiques.

Il est susceptible de plusieurs modifications.

Autorité de Lamé.

« L'existence du fluide éthéré, dit Lamé, est incontestablement démontrée par la propagation de la lumière dans les espaces planétaires ; par l'explication si simple, si complète des phénomènes

de la diffraction dans la théorie des ondes ; et, comme nous l'avons vu, les lois de la double réfraction prouvent avec non moins de certitude que l'éther existe dans tous les milieux diaphanes. Ainsi la matière pondérable n'est pas seule dans l'univers ; ses particules nagent en quelque sorte au milieu d'un fluide. Si ce fluide n'est pas la cause unique de tous les faits observables, il doit au moins les modifier, les propager, compliquer leurs lois. Il n'est donc plus possible d'arriver à une explication rationnelle et complète des phénomènes de la nature physique sans faire intervenir cet agent dont la présence est inévitable. On n'en saurait douter, cette intervention, sagement conduite, trouvera le secret ou la véritable cause des effets qu'on attribue au calorique, à l'électricité, au magnétisme, à l'attraction universelle, à la cohésion, aux affinités chimiques ; car tous ces êtres mystérieux et incompréhensibles ne sont au fond que des hypothèses de coordination, utiles sans doute à notre ignorance actuelle, mais que les progrès de la véritable science finiront par détrôner[1]. »

Nous ne pouvons rien ajouter à ces remarquables conclusions ; contentons-nous de hâter par nos vœux la venue du jour où la philosophie naturelle sera délivrée de ces puissances imaginaires et mystérieuses.

Nous allons actuellement examiner les phénomènes électriques et chercher quels arguments ils fournissent à l'appui de notre système.

[1] Lamé, conclusion finale de l'ouvrage cité. — Pour les mouvements rotatoires moléculaires, voyez *Bull. météorol. de l'Observatoire de Paris*, 17 décembre 1863 (M. de Colmet d'Huart).

LIVRE III

DE L'ÉLECTRICITÉ

INTRODUCTION

Le sujet que nous abordons est beaucoup plus vaste et plus complexe qu'aucun de ceux traités jusqu'ici ; ce ne sont plus quelques détails de doctrine qui divisent les savants, mais les faits eux-mêmes n'ont pas été complétement constatés et étudiés, et, à dire vrai, il n'existe pas encore une seule théorie générale à l'aide de laquelle ont ait essayé de synthétiser la quantité innombrable des faits observés. Dans ce troisième livre, nous nous hasardons à aborder ce gigantesque problème, et notre tentative ne mérite pas d'être taxée de témérité, car le courage d'affronter une question aussi ardue nous est inspiré par notre profonde conviction que l'accumulation incessante de faits et d'observations de tout genre est très-préjudiciable à la science, lorsqu'on ne cherche pas à coordonner tous ces résultats dans un ensemble systématique. Vu l'ampleur du sujet, notre travail présentera assurément des inexactitudes, au moins dans les détails, et nous nous estimerons heureux si nous parvenons à traiter d'une manière satisfaisante les questions fondamentales. Étendue du problème.

Les théories reçues par les électriciens modernes peuvent être réduites à deux. Pour les uns, l'électricité est un mouvement de la matière pondérable ; pour les autres, les manifestations électriques sont dues à un fluide impondérable en mouvement, et ce fluide serait le même qui produit la lumière. Il est inutile de par- Deux opinions principales.

ler de la théorie des deux fluides, car elle ne tardera pas à être complétement abandonnée. Le fluide calorifique n'existant pas, on est porté tout naturellement à en dire autant de son congénère le fluide électrique. Rien de plus facile et de plus séduisant que de résoudre chaleur et électricité en des modes de mouvements propres à la matière pondérable; malheureusement nous citerons des faits qui empêchent d'accepter cette manière de voir. Nous avons déjà reconnu que l'hypothèse de l'éther était nécessaire lorsqu'on veut expliquer comment les phénomènes de lumière et d'attraction peuvent se produire dans le vide. Le physicien doit toujours ne pas s'attarder dans les cas particuliers et s'élever à la considération des problèmes sous leur aspect le plus général. Quelques-uns croient avoir trouvé la vraie solution en disant que l'électricité est une force, mais si par force on entend une abstraction, on tombe dans les anciennes erreurs; si, au contraire, on entend un mode de mouvement, nous acceptons l'expression. Reste alors à montrer qu'il est possible de concevoir les phénomènes sans admettre un état particulier de la matière ordinaire. Pour nous, fidèle à la méthode que nous avons adoptée, nous commencerons par résumer les faits en dehors de toute hypothèse particulière, puis nous chercherons à les grouper en une théorie générale.

CHAPITRE PREMIER

IDÉE GÉNÉRALE DE LA FORCE ÉLECTRIQUE. — SA NATURE RÉPULSIVE.

Formes de l'électricité. L'électricité, cet agent puissant qui nous fut révélé par le pouvoir attractif développé dans l'ambre (ἤλεκτρον) à l'aide du frottement, affecte deux modes bien distincts : à l'état de tension, elle se manifeste par des attractions et des répulsions exercées sur les corps légers : à l'état de *courant électrique*, elle se reconnaît facilement par la déviation qu'elle fait subir à une aiguille aimantée.

Tension. Courant. L'électricité de tension devient courant électrique toutes les fois qu'il se produit une décharge entre des corps électrisés; cette décharge peut se faire *silencieusement* à travers un conducteur; d'autres fois, au contraire, elle est *explosive* lorsque, par exemple,

elle éclate violemment dans l'air en s'accompagnant d'une production de chaleur et de lumière. Les faits que nous venons de rappeler sommairement sont connus de tous, et, pour être clairs, il nous a fallu employer les expressions communément reçues. Ces expressions impliquent certaines idées systématiques, car, à mesure que les physiciens découvraient de nouveaux phénomènes, ils imaginaient, pour les représenter, des dénominations fondées sur les analogies qui leur paraissaient les plus évidentes. Il serait donc nécessaire d'examiner la valeur de ces termes, afin de reconnaître si nous devons continuer à les employer ; cependant, pour faciliter l'intelligence du sujet, nous continuerons à parler le langage habituel des électriciens, mais nous prévenons le lecteur que parfois les mots employés paraîtront contredire nos idées.

Des phénomènes de tension qui cependant furent les premiers découverts, il est difficile de tirer des notions exactes sur la nature de la force électrique ; mais leur importance est telle, que nous devons leur accorder la première place dans notre résumé des faits principaux de l'électricité, nous réservant de donner plus tard leur explication. Importance des phénomènes de tension.

La force électrique se manifeste toujours sous deux modalités *égales* et *opposées*, nommées l'une *positive*, l'autre *négative*, parce que, toutes les fois qu'elles se développent, elles sont d'égale intensité, et, de plus, si leurs tensions présentent la même intensité, réunies elles rétablissent l'état naturel des corps, c'est-à-dire leur condition habituelle. Ces locutions sont indépendantes de toute théorie, elles sont la traduction immédiate des faits. Dans tous les cas où, par les rapports établis entre deux corps, la force électrique prend naissance, elle apparaît constamment sous ses deux formes à la fois, l'un des corps se constituant à l'état *positif* et l'autre à l'état *négatif*. Le mode d'excitation peut être une action mécanique, telle que frottement, pression, percussion, ou une réaction chimique, ou une influence thermique, peu importe, le résultat reste toujours le même. Dans ces expériences, une même substance ne présente pas invariablement le même état électrique, et le sens de son électrisation dépend des conditions de l'expérience elle-même; telle substance qui est positive avec un corps donné est négative avec un autre. Lorsqu'on expérimente sur des Double modalité de la tension + et —. Condition relative.

corps de même nature, l'effet résultant dépend du degré de poli ou d'âpreté de la surface, de l'étendue plus ou moins grande sur laquelle opèrent les agents mécaniques, de la température plus ou moins élevée de l'un des corps en présence, etc. Nous pouvons donc énoncer cette règle générale : *L'état électrique qui prend un corps n'a rien d'absolu, il est purement relatif.*

Attractions et répulsions. La force électrique est caractérisée par les attractions et les répulsions qui s'observent, suivant leur état électrique opposé ou semblable, entre masses rendues convenablement mobiles. On admet comme principe fondamental de l'action de la force électrique que *les corps électrisés de la même manière se repoussent, et ceux électrisés contrairement s'attirent.* On a d'abord regardé ces attractions et ces répulsions comme s'exerçant à distance. Dans la suite, les faits étant mieux interprétés, on reconnut qu'il fallait tenir grand compte des conditions du phénomène. Ainsi : 1° l'intervalle qui sépare les corps électrisés peut être occupé par une substance pondérable, ou bien : 2° les corps électrisés sont placés dans le vide absolu. Dans le premier cas, d'après les recherches de Faraday et de Matteucci, il se produit au sein du milieu interposé une modification nommée *induction*, par l'intermédiaire de laquelle l'action électrique se transmet d'un corps à l'autre. Les effets d'induction diffèrent avec les substances : ainsi, dans certaines substances, dites isolantes, telles que l'air, le verre, la gomme laque, etc., tout se réduit à un simple jeu de force intermoléculaire, s'établissant pregressivement dans les couches successives de la substance. Voici un exemple : un paquet de feuilles de mica étant enfermé entre deux armures métalliques qui reçoivent des tensions électriques opposées, chacune des feuilles se montre électrisée, et le signe de l'état électrique appartenant à l'une de ses faces est contraire à celui de l'armure vers laquelle cette face est tournée, tandis que de l'autre côté la feuille de mica est électrisée semblablement à cette même armure. M. le professeur Blasevra vient de découvrir que la vitesse de propagation de l'induction dans les corps isolants est très-faible. Pour l'air elle est de 153^m par seconde, et pour la gomme laque et le soufre encore moindre de 55^m et 57^m. Cette lenteur prouve le rôle joué par la matière pondérable dans ce phénomène, etc. Toute discussion sur

Induction.

Vitesse de l'induction.

ce sujet serait prématurée actuellement, nous la renvoyons à un chapitre suivant. Reste le second cas, celui des corps électriques placés dans le vide absolu ; malheureusement ici les résultats fournis par l'observation sont loin d'être concluants. Cependant tout s'accorde à prouver que dans le vide absolu l'électricité de tension ne passe pas, et que la présence de la matière pondérable est indispensable. Cela est admis maintenant par tous les physiciens. En effet nous n'avons encore aucun fait qui prouve ce passage dans le vide absolu ou planétaire, et nous connaissons certains phénomènes qui sont en faveur de l'absence de transmission par ce vide. Nous reviendrons sur ce point important.

Action dans le vide.

Particularités des métaux

Les métaux sont électrisables par le frottement, mais les effets de la force électrique ne se manifestent que lorsqu'ils sont isolés, autrement cette force se perd dans le sol. De plus, c'est en opérant sur des masses métalliques que l'on peut observer les phénomènes d'induction les plus nets et les mieux caractérisés. Un conducteur isolé étant placé à une distance convenable d'une source électrique, aussitôt l'extrémité la plus voisine de la source s'électrise contrairement, et l'extrémité opposée semblablement au corps inducteur, de telle sorte que la distribution de la force électrique semble se faire d'une manière continue sur toute la surface induite, c'est-à-dire que l'on n'observe point cette succession de tranches à signes alternativement contraires, dont on constate l'existence dans les corps isolants.

Induction curviligne

On a prétendu que la force inductrice se propageait en lignes courbes[1], car ses effets ont été observés sur certaines parties de corps tellement disposés qu'il était impossible de concevoir une action rectiligne; et on rappelait, à ce propos, que les émanations lumineuses des corps électriques affectent des directions curvilignes. Mais on confondait ainsi la ligne géométrique, qui représente la valeur d'une certaine intensité dans la distribution électrique autour d'un corps, avec la ligne de propagation de la force elle-même ; or, tandis que celle-ci est essentiellement droite, l'autre peut être courbe.

Les théories imaginées par les physiciens et adoptées par les géomètres dans le but de représenter les phénomènes électriques

[1] Faraday. (*Note du traducteur.*)

sont bien connues, mais elles ne sont que des hypothèses et n'expriment que des lois primitives qui peuvent subsister avec un grand nombre de causes différentes; aussi ne nous apprennent-elles rien sur la cause directe et véritable de ces phénomènes.

Lois de l'action électrique.

Rappelons brièvement ces lois.

1° La force électrique agit en raison inverse du carré de la distance.

2° Elle ne peut se manifester en l'absence de la matière pesante, les expériences récentes de Grove et de Gassiot, faites au milieu du vide obtenu par procédé chimique, ont prouvé que dans un espace privé de matière pesante, la décharge électrique directe ne passe pas. Il n'a pas encore été possible de décider si une action inductrice pure et simple et transmissible à travers le vide; car les expériences faites sous le récipient de la machine pneumatique ne sont nullement concluantes.

Elle est une force expansive.

3° Elle se range parmi les forces expansives. Arrivée à un certain degré d'intensité, elle sépare de la substance électrisée des parcelles en quantité appréciable à la balance, et les met en vibration calorique et lumineuse. Tel est le cas de la décharge *disruptive* ou par *étincelle*. Il est établi d'une façon indubitable que l'étincelle consiste dans une volatilisation et une combustion de parcelles détachées des corps entre lesquelles elle éclate; en effet, l'analyse spectrale de l'étincelle fournit un spectre composé entièrement des raies lumineuses caractérisant les métaux transmettant la décharge. La diffusion lumineuse des solides ne diffère pas au fond de celle qu'on observe lorsque l'électricité se décharge à travers un fluide; ainsi l'eau est rapidement dispersée et diffusée par la décharge électrique.

Effets lumineux.

Les traits de feu que l'on tire des métaux électrisés, les aigrettes brillantes qui apparaissent quelquefois à leur surface, ne sont pas les seuls effets lumineux de l'électricité; de toutes les substances isolantes frottées ou frappées dans l'obscurité au milieu d'une atmosphère suffisamment sèche, on peut faire jaillir une étincelle; quelques-unes émettent de vives lueurs lorsqu'on les brise (sucre, soufre, chlorure de calcium, etc.). Ces lueurs ont certainement une origine électrique, elles sont produites par l'agitation moléculaire dans les points soumis à l'action mécanique. On les a

d'abord nommées phosphoriques ; mais elles diffèrent essentiellement de celles produites par le phosphore, car ces dernières accompagnent ordinairement l'oxydation du métalloïde, et les lueurs électriques sont provoquées par certains mouvements moléculaires, ou par l'agitation et les variations de pression dans l'atmosphère ambiante[1]. Nous avons déjà indiqué les causes de la phosphorescence, et nous pouvons en conclure que si la décharge électrique s'accompagne de brillants phénomènes lumineux, cela tient à ce qu'elle ébranle violemment les molécules superficielles des corps ; surtout dans ceux où, soit par une pulvérisation, soit par une attrition préalable, la cohésion a été grandement affaiblie.

On s'est demandé si cette tendance à l'expansion, cet effort incessant vers l'extérieur, propre aux particules de la surface, se rencontrait exclusivement dans les corps, alors qu'ils sont soumis aux influences électrisantes, ou bien si elle y existe constamment, même quand ils sont à l'état naturel. Force diffusive

Au livre Ier, nous avons dit que Fusinieri, Bizio et Zantedeschi ont réuni un grand nombre de faits tendant à prouver que les corps, pour la plupart, dans les conditions ordinaires, laissent échapper incessamment des émanations matérielles. Cette émission de particules constitue l'évaporation dans les liquides, et la sublimation lente dans les solides ; celle-ci est habituellement insensible à la température ordinaire, mais elle se développe considérablement à un degré thermométrique plus élevé. Cette évaporation peut être rendue considérablement plus intense avec l'électricité. Ainsi une masse d'eau quelconque s'évapore rapidement étant mise en communication avec une machine électrique.

Mais il y a une différence considérable entre les effets qui s'accomplissent tranquillement dans l'évaporation ordinaire, et ceux qui s'accomplissent sous l'action électrique. Les premiers supposent toujours une température de la masse proportionnelle à l'effet, tandis que sous l'action électrique les disgrégations superficielles ont lieu avec une élévation de température du corps entier qui n'est point proportionnelle au résultat obtenu. Disgrégation superficielle.

Cela nous fait voir que l'électricité est quelque chose différente de la chaleur, et que sa force répulsive tient à un autre principe Différence entre la chaleur et l'électricité.

[1] Voyez Bizio, *Dinamica chimica*, t. I, page 104.

que la simple oscillation moléculaire. De plus, l'action électrique se manifeste indépendamment de la température sur la surface des corps et y produit des effets différents selon la cohésion des particules qui sont adhérentes à la masse. Si l'adhérence est faible, les matières sont projetées à distance avec violence. Ainsi, lorsqu'on dirige l'étincelle d'une batterie à travers une médaille frottée de plombagine posée à plat sur une feuille de papier ou de verre, on obtient une reproduction exacte de la pièce dessinée sur la surface employée; même sans plombagine, on peut obtenir l'image sur le verre ou autre corps isolant : image qui est due à la projection de l'oxyde et des poussières plus ou moins adhérentes qui sont sur la médaille. Cette image est rendue très-apparente en projetant un mélange de minium et de soufre, ou simplement l'humidité de l'haleine sur la lame isolante[1]. Ces effets, à l'intensité près, ne diffèrent point des empreintes laissées par la foudre lorsqu'elle retrace, à des distances souvent très-grandes, le contour des objets atteints par la décharge.

Mouvements superficiels.

Les faits mentionnés jusqu'ici et un grand nombre d'autres semblables nous conduisent à regarder *les phénomènes produits par la tension électrique comme causés simplement par l'exagération des mouvements à la surface des corps.* Un certain nombre des phénomènes que produisent les décharges électriques violentes, comme les coups de foudre, sont l'effet de l'échauffement intérieur des masses et surtout de l'évaporation de l'eau et de l'humidité rencontrées dans son trajet par l'étincelle, mais à la surface des corps se manifeste toujours une accumulation d'énergie qui ne saurait s'obtenir par une simple élévation de température de la masse. Ainsi nous pouvons conclure que : *ici nous sommes en présence d'une force nouvelle;* force capable d'exciter de la chaleur, c'est-à-dire d'ébranler les molécules des corps, mais dans laquelle tout ne peut pas se réduire à ce simple ébranlement. Le problème qui se présente à nous actuellement est de rechercher en quoi consiste ou quelle est l'origine de cette nouvelle force.

L'électricité force nouvelle.

Ici il n'y a de solution possible que l'une des deux suivantes : 1° ou nous sommes en présence d'une force abstraite, *sui generis*

[1] Figures de Lichtenberg et images de Morren.

différente de celles examinées jusqu'ici ; ou 2° elle est un résultat provenant des forces connues qui dominent la matière. Cette seconde hypothèse est la seule manière philosophique d'interpréter la nature, ou au moins c'est la seule qu'il faille adopter jusqu'à ce que l'impossibilité d'expliquer les phénomènes par son moyen soit absolument reconnue.

Réellement résultante des forces connues.

Or la discussion des phénomènes thermiques et optiques nous a révélé que les corps sont constitués par deux principes immédiats : l'élément pondérable et l'impondérable ou éther : et comme la matière pesante ne saurait rendre compte à elle seule des effets produits par cette nouvelle force, ainsi sommes-nous forcé à recourir à l'impondérable, et nous devrons examiner si les faits observés ne seraient pas explicables par son intervention.

Cependant faisant pour le présent compléte abstraction des connaissances acquises, nous examinerons à quelles conclusions nous conduira l'analyse des phénomènes électriques; réservant toute affirmation sur la nature de la matière qui entre en mouvement jusqu'au moment où, les faits eux-mêmes ayant éclairé le sujet et fourni des données positives, il nous sera permis de formuler une opinion.

Réserve actuelle.

Donc, pour le moment, nous ne savons pas s'il existe un fluide électrique, encore moins si ce fluide est identique avec l'éther, et nous laissons à l'observation le soin de nous renseigner. Cela posé, sans nous astreindre à suivre l'ordre chronologique des découvertes, abordons immédiatement l'examen des faits les plus propres à nous donner des notions précises sur la force électrique, l'une des plus puissantes de la nature. Il est bon de rappeler au lecteur que dans cette étude nous conserverons la terminologie usuelle ; aussi, quand il nous arrivera d'employer des expressions paraissant impliquer une hypothèse particulière, cela ne sera jamais intentionnellement, car nous nous servirons des termes consacrés sans rechercher, au moins pour l'instant, si leur signification est exacte ou non.

Déclaration.

CHAPITRE III

PREMIÈRES RECHERCHES SUR LA NATURE DU COURANT ÉLECTRIQUE. ACTIONS ÉLECTRO-DYNAMIQUES.

Phénomènes dans la pile de Volta.

Les phénomènes de tension présentés par les corps électrisés statiquement nous donnent bien la preuve de l'existence d'une force résidant à la surface des corps, mais ils ne nous apprennent rien touchant les modifications intérieures qui peuvent être déterminées par elle ; heureusement le rhéomoteur ou *pile* imaginée par Volta nous permet d'étudier ces effets sous les aspects les plus variés. Lorsque, cet appareil étant isolé, on l'étudie sous le rapport de la tension, on trouve ses deux extrémités électrisées l'une positivement, l'autre négativement, mais il serait impossible encore au présent de dire en quoi consistent physiquement ces deux états électriques différents. Une seule chose est parfaitement démontrée, c'est que les attractions, les répulsions, les effets calorifiques et physiologiques produits par la pile ne diffèrent pas des phénomènes de même genre produits par un corps électrisé à l'aide du frottement. Cette identité reconnue d'abord par Volta lui-même a été définitivement établie par Faraday. D'où on a conclu que la même force électrique pouvait avoir des origines différentes.

Tension.

Courant.

Vient-on à réunir les extrémités d'une pile au moyen d'un conducteur, alors apparaissent des phénomènes d'un tout autre genre. Si le conducteur est un liquide décomposable, il se réduira en ses éléments, qui, une fois séparés, se dirigeront, les uns vers le pôle positif, les autres vers le négatif. Si la communication interpolaire est établie à l'aide d'un fil métallique, il s'échauffera, bien plus il pourra fondre, de même que cela lui arriverait sous l'influence d'une décharge de Leyde ; en outre, il influencera les aiguilles aimantées, les attirera ou les repoussera, et il produira divers autres effets mécaniques dans le cas où certaines parties du circuit sont rendues mobiles à l'aide de dispositions spéciales. Tous ces phénomènes qui s'ajoutent à ceux déjà considérés dans le cha-

pitre précédent nous prouvent que *la ligne affectée par la force électrique*, est le siége d'une action particulière sur la matière, et nous fournit des nouvelles données sur le mode d'action de cette force, et nous permettra d'éclairer les phénomènes de tension. Pour la brièveté de langage nous appellerons avec les physiciens — *courant électrique* — cette même *ligne affectée par la force électrique*, sans cependant pour le moment supposer qu'aucun fluide véritable soit en circulation.

Courants de la machine électrique.

Les effets que nous venons de rappeler succinctement sont décrits tout au long dans les cours élémentaires de physique; nous ne nous arrêterons donc pas à leur exposition; il nous suffit de faire remarquer que ceux obtenus lorsqu'on ferme le circuit d'une pile diffèrent seulement par l'intensité de ceux que l'on obtiendrait en réunissant, à l'aide d'un fil métallique, les coussins de la machine électrique ordinaire avec ses conducteurs. Cependant la pile nous offrant une plus grande facilité pour répéter les diverses expériences, elle est employée de préférence dans les démonstrations. Fidèle à la marche suivie dans les chapitres précédents, nous exposerons d'abord les faits, puis nous chercherons à les interpréter.

Direction du courant.

Commençons par les propriétés fondamentales du courant. Une des particularités caractéristiques du courant, c'est d'avoir *une direction déterminée*, si bien qu'il produit deux séries de phénomènes inverses, en allant du zinc au cuivre et en circulant du cuivre au zinc. On admet que le courant circule du pôle positif au pôle négatif, dans les conducteurs, c'est-à-dire, que l'on nomme sens du courant celui du dégagement de l'hydrogène, lors de la décomposition électrolytique de l'eau. D'où il résulte que le sens du courant, dans un fil réunissant le pôle zinc au pôle cuivre, sera la direction prise en allant du dernier zinc au premier cuivre.

Expérience d'Œrsted.

Cette propriété du courant d'avoir une direction est encore rendue très-manifeste par les découvertes d'Œrsted. Avant ce physicien, dans toutes les expériences relatives aux attractions et aux répulsions produites par la pile, on avait toujours maintenu séparés les pôles; aussi obtenait-on simplement les attractions et les répulsions ordinaires propres aux corps électrisés par tension. Œrsted employant dans ses expériences une aiguille aimantée,

Influence sur l'aiguille magnétique.

comme moyen électroscopique, eut le bonheur de voir l'aiguille, qui se mouvait à peine lorsque les pôles étaient séparés, se dévier, au contraire, très-fortement lorsque le circuit conducteur était fermé.

Même en regardant l'observation dont nous venons de parler comme due à un heureux hasard, nous ne saurions trop admirer toute la sagacité déployée par le physicien danois dans l'étude des lois du nouveau phénomène, dont il varia les conditions de toutes les façons imaginables. Aussi fit-il connaître la série complète des résultats que l'on peut obtenir en faisant agir sur une aiguille aimantée un conducteur traversé par la force électrique. La règle suivante résume tous les cas. Supposons une aiguille aimantée, en équilibre, et un fil traversé par le courant placé au-dessus d'elle parallèlement à sa longueur, la pointe nord de l'aiguille dévie vers l'ouest ou vers l'est, suivant que le courant s'avance vers le nord ou vers le sud; le contraire se produit si le fil est au-dessous de l'aimant.

Polarité transversale des conducteurs.

Œrsted essaya de donner une théorie de ces faits, il les rapportait à une *polarité transversale* communiquée au fil par le courant électrique. D'après ses idées, un fil traversé par le courant pouvait être assimilé à un assemblage d'aimants très-petits, perpendiculaire à sa longueur, il n'était donc pas étonnant de voir l'aiguille se mettre en croix avec sa direction, car ainsi elle devenait parallèle aux aimants moléculaires. A l'exception des phénomènes qui lui ont donné naissance, aucun fait nouveau ne vient appuyer cette théorie, aussi doit-elle être considérée comme une façon particulière d'exposer les résultats obtenus, ingénieuse il est vrai, mais ne reposant sur aucune démonstration solide.

Recherches d'Ampère.

Ces découvertes furent connues en France quelques mois après leur publication, et aussitôt elles attirèrent l'attention d'Ampère. Il aborda cette question avec la supériorité que seule peut donner une connaissance approfondie des mathématiques; en quelques semaines, une science nouvelle était créée; et c'est à juste titre qu'Ampère a été nommé le Newton de l'*électro-dynamique*.

Insuffisance de la théorie d'Œrsted.

La théorie d'Œrsted fut promptement abandonnée, car on reconnut qu'elle péchait par deux points capitaux : 1° elle explique l'inconnu par l'inconnu. En effet, qu'est-ce que la polarité, et,

en particulier, la polarité magnétique? On a tellement abusé de cette expression, qu'un esprit positif hésite à l'accepter, si préalablement elle n'est pas rigoureusement définie; or Œrsted avait négligé ce premier point. 2° La théorie de la polarité dans certains cas, dont nous parlerons plus loin, oblige à admettre une force agissant perpendiculairement à la ligne conduite du centre d'attraction au point attiré; hypothèse contraire aux lois qui régissent toutes les autres forces, car leur action s'exerce constamment suivant la ligne droite passant par les points sollicités.

Ampère, guidé par certaines idées sur la constitution de la matière, retourna l'hypothèse d'Œrsted, et il regarda les aimants comme formés par des courants. L'idée mère de la nouvelle théorie fut cette considération que la terre fonctionne comme un vaste aimant, et qu'il est fort probable que ses propriétés magnétiques sont la résultante des nombreux courants électriques développés dans le globe terrestre par des actions chimiques et thermiques; étendant son raisonnement aux aimants en général, il réussit à reproduire tous les phénomènes magnétiques à l'aide de simples spirales de fils de cuivre parcourus par des courants, nommés *solénoïdes*. Le point de départ de son raisonnement était le fait d'expérience suivant : si un conducteur présente des sinuosités peu prononcées, son action est semblable à celle d'un conducteur rectiligne, ayant mêmes extrémités que le fil sinueux; ceci posé, il en conclut que la composition des forces génératrices du courant s'opérait suivant les règles connues de la statique ordinaire; seulement on devait tenir compte, et des attractions variant en raison inverse du carré de la distance, et de la *direction* du courant dans le conducteur. Par ses recherches analytiques, Ampère arrira ensuite à une conclusion extrêmement importante. Deux éléments de courant infiniment petits s'attirent en raison composée directe de leurs intensités respectives, inverse du carré des distances, et directe d'une certaine fonction des angles formés par leurs directions. Nous devons remarquer, au sujet de cet énoncé, que l'action entre deux courants angulaires peut-être remplacée par deux autres : une attractive entre les éléments parallèles en lesquels se peuvent décomposer les courants; une autre, répulsive entre deux éléments placés sur une même ligne droite, et ces actions partielles sont dans un rap-

Aimants formés de courants.

Composition des courants.

port constant $-\frac{1}{2}$. Par suite, les parties consécutives d'un même courant se repoussent.

Lois des actions réciproques des courants.

D'où résultent les lois suivantes pour les courants finis :

1° Deux courants parallèles s'attirent quand ils sont de même sens et se repoussent quand ils sont de sens contraire.

2° Deux courants angulaires tournent autour de leur perpendiculaire commune jusqu'à devenir parallèles et de même sens.

3° Deux systèmes de courants circulaires parallèles fixés à un même axe perpendiculaire à leur plan (*solénoïdes*) s'attirent et se repoussent mutuellement à la manière de deux aimants.

4° Les aimants ont toutes les propriétés des solénoïdes.

Les faits observés par Œrsted rentraient ainsi dans la théorie générale en qualité de cas particuliers, et leur explication ne nécessitait pas de recourir à des principes autres que ceux reçus en mécanique pour la composition des mouvements.

Relation des deux théories.

Mais à bien examiner les choses, jusque-là la question avait été simplement retournée, Œrsted assimilant les courants à des aimants, Ampère, au contraire, assimilant les aimants à des courants. De telle sorte qu'on traitait, dans un cas comme dans l'autre, de phénomènes statiques, de phénomènes d'équilibre entre forces que l'on peut concevoir *émaner de centres fixes*, et ainsi on ne sortait pas du cercle des forces connues jusqu'alors. On ne tarda pas à faire une série de découvertes d'un genre tout nouveau, qui fournirent des données fort utiles pour déterminer la vraie nature des phénomènes déjà connus. Nous voulons parler de la rotation continue des aimants, constatée par Faraday.

Rotation des aimants.

Cette expérience remarquable, résultat d'idées théoriques fausses, fut bientôt suivie par une autre que Savary déduisit de la théorie rationnelle et des formules d'Ampère. Il montra que les mêmes phénomènes de rotation s'observent sur les conducteurs traversés par les courants.

Si (fig. 23) l'on fait flotter un aimant cylindrique *ab* dans une masse de mercure, en le lestant au moyen d'un morceau de platine *p*, de telle sorte que son axe soit vertical, lorsque, par les conducteurs A, C, D, on dirige un courant énergique à travers l'aimant et le mercure, l'aimant prend un mouvement de rotation assez rapide, bien que le mercure, à cause de sa grande densité,

exerce sur lui un frottement très-notable. Bien plus (fig. 24), en plaçant simplement les rhéophores en deux points différents du mercure, l'un au centre en G, l'autre à la circonférence en E, l'aimant flotteur présente un double mouvement de translation et de rotation qui rappelle à l'esprit les mouvements planétaires, et tout cela malgré la résistance énorme du bain métallique. Ces faits conduisirent à admettre entre l'aimant et le mercure une force tangentielle perpendiculaire à la droite qui réunit les deux corps. Mais Ampère montra que cette action tangentielle n'est pas primitive, qu'elle est réellement un effet secondaire, facile à expliquer,

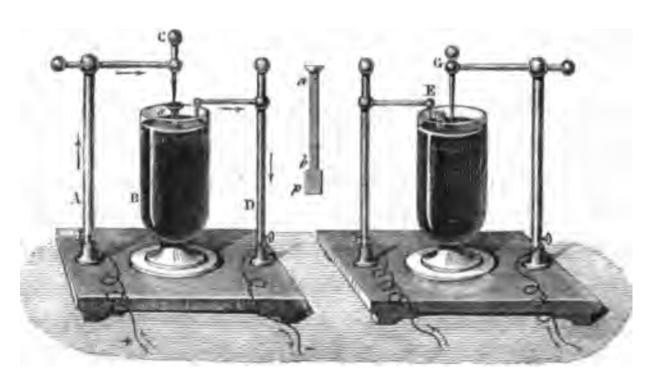


Fig. 23. Fig. 24.

d'après les lois connues des courants électriques, pourvu que les conducteurs ne forment point un circuit parfaitement fermé, car, dans ce cas, les courants agissent exclusivement comme forces dirigées vers un centre fixe, et sont dès lors incapables de produire la composante tangentielle et l'accroissement de force vive. En confirmation de cette théorie, il a construit un appareil dans lequel un conducteur mobile tourne continuellement par l'action d'une spirale circulaire. Toutes ces questions furent constamment traitées d'après les principes de la composition des forces que l'on considère habituellement en mécanique ; de telle sorte que les forces transversales, admises d'abord pour expliquer certains phénomènes, furent complétement abandonnées, les faits signalés rentrant dans les règles ordinaires.

Rotations des conducteurs.

Ces faits sont importants au point de vue théorique ; ils ne nous

Travail du courant.

apprennent pas encore à la vérité en quoi consiste ce que l'on nomme un courant, mais ils nous montrent que les conducteurs ne sont pas dans l'état de simple équilibre statique, nommé ordinairement polarité ; ils présentent une autre activité, susceptible de vaincre la résistance des frottements exercés par les milieux dans lesquels ils sont immergés, et ils sont animés par une force produisant un *travail*, par une force qui leur restitue la force vive absorbée par les frottements. Dans la polarité les forces développées sont toujours réductibles à des systèmes de forces dirigées vers des centres fixes : durant le cercle complet de leur action, elles ne peuvent pas produire un accroissement de force vive, elles sont donc insuffisantes pour expliquer la nombreuse classe des faits en question.

Reconnu par Ampère.

Ampère reconnut parfaitement l'importance de ces découvertes, et il écrivait : « Un mouvement qui se continue toujours dans le même sens, malgré les frottements, malgré la résistance des milieux, *et ce mouvement produit par l'action mutuelle de deux corps qui demeurent constamment dans le même état*, est un fait sans exemple dans tout ce que nous savions des propriétés que peut offrir la matière inorganique ; il prouve que l'action qui émane du conducteur voltaïque ne peut être due à une distribution particulière de certains fluides en repos dans ces conducteurs, comme le sont les attractions et les répulsions ordinaires. *On ne peut attribuer cette action qu'à des fluides en mouvement dans les conducteurs* qu'ils parcourent, en se portant rapidement d'une des extrémités de la pile à l'autre[1]. »

Le courant est un état dynamique.

Ces faits prouvent que ce que nous avions nommé courant est un véritable *état dynamique de la matière*, c'est-à-dire un mouvement s'accomplissant à l'intérieur du conducteur. Reste maintenant à chercher de quel genre est ce mouvement[2]. Évidemment ce ne peut être par un simple mode de vibrations, car dans les mou-

[1] *Recueil d'observations électro-dynamiques*, p. 205, 8 avril 1822, et p. 297.

[2] Il est surprenant de voir Grove sur un point aussi capital recourir encore aux forces transversales, alors que l'impossibilité d'expliquer les expériences d'Ampère à l'aide de ces forces est démontrée. Bien plus, les travaux de l'illustre physicien français ne sont cités nulle part dans le livre *Sur la corrélation des forces physiques* (voir page 137). Il est aisé de présenter une théorie sous un jour favorable en laissant dans l'ombre les points difficiles. Nous sommes surpris encore de voir un physicien illustre, M. Cantoni, recourir aux polarités.

vements vibratoires la force vive du système devenant périodiquement nulle, ils ne peuvent donner comme résultante extérieure un mouvement de translation : ici la vibration doit s'accompagner d'une véritable translation moléculaire, ou, comme le disait fort bien Ampère, d'un mouvement de fluides.

Avant de quitter le passage d'Ampère que nous venons de rapporter, faisons remarquer la première partie imprimée en italique. Dans ces lignes, l'auteur, parlant le langage de son époque, semble admettre que les corps d'où émanent les forces génératrices du courant demeurent dans un état invariable; opinion reconnue aujourd'hui manifestement erronée. Nul courant électrique ne peut se produire sans une modification correspondante de la substance constituant l'électromoteur; dans la pile cette modification consiste en une altération chimique des liquides et de l'un des métaux employés. Lorsqu'on veut établir une pile, le contact des éléments est nécessaire, car il assure la conduction de la force électrique; peut-être, et c'est déjà beaucoup dire, il ajoute à l'action électromotrice, mais les phénomènes électro-dynamiques nous apprenant que le courant, dans certains cas, produit du travail d'une façon continue, et ce travail ne pouvant être créé de rien, il prend donc sa source au sein de l'appareil qui fournit le courant; dans la pile, cette source est indubitablement l'altération chimique de ses éléments. Nous pouvons dès à présent regarder comme tranchée la fameuse question de savoir quelle est l'influence du contact des métaux dans la pile. Remarque importante. Source du courant.

Ampère conclut franchement que ces phénoménes sont dus au transport d'un fluide, et, suivant nous, il a raison; mais cette hypothèse a été combattue par certains physiciens qui attribuent le développement du courant à un mouvement vibratoire. Afin d'être à même de décider la question, il nous faut préalablement étudier plus sérieusement l'origine et la propagation du courant. En ce moment nous nous abstiendrons de prononcer entre les deux hypothèses; toutefois la production de mouvements, que des résistances et des frottements incessants ne parviennent pas à détruire, nous oblige à regarder la pile comme une machine en activité, dans laquelle la force est engendrée en certains points, absorbée en d'autres ou plutôt transformée en tra- La pile véritable machine en activité.

vail extérieur, travail qui peut être très-différent de celui obtenu avec les machines ordinaires, mais dont le développement est soumis aux lois générales de la dynamique. Même les phénomènes électrostatiques nous donnent du travail mécanique comme ceux du tourniquet électrique, des attractions et répulsions, et du mouvement qui s'obtient sur le disque d'une machine de Holtz lorsqu'elle est mise en relation avec le disque d'une machine ordinaire. Mais la source de ces travaux est le travail même qui est employé à produire l'électricité, et ce ne sont que des transformations de travail, obtenues soit par la diffusion de l'air par les pointes, soit par l'induction, etc. Ainsi donc les mouvements ampériens supposent dans la pile un travail qui se transforme en mouvement mécanique dans les organes de ses machines. Ce travail sera encore plus manifeste dans les phénomènes que nous allons examiner.

CHAPITRE III

EFFETS CALORIFIQUES DU COURANT. — NOTIONS QU'ILS NOUS FOURNISSENT SUR SA NATURE.

Travail thermique du courant.

Que le courant soit un mouvement dans l'intérieur des conducteurs, et non une simple disposition statique de la matière, on ne doit plus en douter d'après les recherches d'Ampère citées dans le chapitre précédent. Le travail mécanique continu, produit dans certains cas par le courant, suppose une force vive, continue, qui seule peut engendrer une matière en mouvement. Aussi, à juste titre, a-t-on appelé ces phénomènes *électro-dynamiques*, car ils dérivent d'une action *dynamique* qui affecte le conducteur. Du reste, non-seulement le courant engendre le travail mécanique proprement dit, lorsque, par exemple, en le traversant, il met en rotation les conducteurs mobiles ou au moins les liquides, mais encore, dans un circuit voltaïque, il se manifeste constamment une action thermique suffisante parfois pour porter à l'incandescence et volatiliser les électrodes et une action chimique étrangère à celle du rhéomoteur; or tous ces effets sont autant de genres de

travail qui tous supposent un mouvement initial et une force génératrice.

Outre ces travaux, nous constatons dans le courant électrique une propriété éminemment propre aux fluides en mouvement : c'est-à-dire la direction déterminée de leur cours.

Réversibilité du courant.

Les phénomènes magnétiques et chimiques montrent dans le mouvement du courant une *direction*, *définie et réversible* avec le conducteur matériel affecté par l'électricité; par suite, l'action dépend de l'angle formé par les conducteurs, condition qui n'appartient pas aux mouvements vibratoires, mais seulement aux flux courants. Cette *réversibilité* (qu'on nous permette l'expression) distingue le courant du mouvement thermique; on peut donc le définir *un mode* de *mouvement ayant une direction définie et réversible*[1].

Questions sur sa nature.

Mais on demandera de quelle nature est ce mouvement. Est-ce le mouvement de translation d'un fluide, comme le nom du courant semblerait l'indiquer? est-ce un simple mouvement oscillatoire analogue, mais non identique au mouvement thermique? est-ce un mouvement de la matière ordinaire ou au contraire de la matière impondérable? est-ce enfin un simple transport de la matière pesante réduite à ses éléments dynamiques? La réponse à ces questions n'est point facile à donner. Chacune des hypothèses précédentes a joui dans son temps d'une grande faveur, chacune d'elles a été soutenue par des auteurs distingués; aussi, pour nous décider en faveur de l'une d'elles, il nous faut consulter les faits, et en particulier ceux relatifs à l'échauffement des fils traversés par le courant, car ils sont de nature à éclairer notre choix.

Lois du travail thermique par le courant.

L'expérience a démontré que, toute influence perturbatrice étant écartée, le dégagement de la chaleur dans un fil traversé par un courant est soumis à certaines lois dont voici les principales :

1° La température finale d'un fil ayant une épaisseur constante est égale dans toutes les sections du circuit, le courant conservant la même intensité ; 2° Dans un fil de section variable la tempéra-

[1] Cette définition du courant ne s'éloigne pas beaucoup de celle de Faraday. Elle est sans doute incomplète; mais elle est si générale, qu'elle embrasse le phénomène dans son genre le plus prochain : reste à fixer la différence dernière selon les préceptes des logiciens.

ture varie en raison inverse du carré de la section ; 3° La chaleur excitée dans un fil par des courants d'intensité différente est en raison du carré des intensités ; 4° Malgré les variations de température et de section l'intensité du courant en chaque point du circuit reste constante.

Définition de l'intensité.

Pour éclaircir ces lois, avant tout il est nécessaire de préciser la signification du mot *intensité*. Nous disons que deux courants ont la même intensité, lorsqu'ils font dévier d'un même nombre de degrés[1] l'aiguille aimantée d'un même galvanomètre ; quelle que soit du reste l'origine du courant. Or, d'après une loi fondamentale des courants électriques, une aiguille aimantée ou un conducteur électro-dynamique mobile étant placé dans un circuit interpolaire, indique dans toutes les sections la même intensité ou quantité d'action, quand bien même, avant ou après, lui il existe certains points en lesquels se produit un travail électro-magnétique ou chimique, ou un travail calorifique intense tel que la lumière électrique. A l'aide de la boussole nous voyons que dans toutes les sections la force statique du courant est la même, et d'autre part le conducteur électro-dynamique mobile nous montre que dans toutes les sections il s'accomplit un travail constant, et qu'il se développe une égale quantité de force vive. De même l'action chimique conserve une égale intensité dans toutes les sections du courant ; aussi est-il indifférent d'intercaler un voltamètre en tel ou tel point d'un fil réophore, le résultat obtenu ne change pas. Si, au lieu d'un fil unique, nous employons deux fils égaux entre eux et au premier pour la longueur et ayant chacun une section moitié de celle du fil primitif (de cette façon la résistance du circuit ne change pas), avec chacun de ces deux fils on obtiendra une déviation moitié de celle observée lorsqu'on expérimentait sur un seul fil. Dans ce dernier cas, le flux restant le même dans tout le circuit, et sa vitesse ne pouvant être changée en rien, seule la masse animée de mouvement, c'est-à-dire la *quantité* qui passe dans un temps donné

La boussole mesure la quantité d'électricité.

[1] Nous parlons de degrés ramenés à la même valeur proportionnelle suivant les procédés indiqués dans les traités élémentaires. De plus, nous nous abstiendrons d'employer ici les valeurs introduites dans la science dans ces derniers temps sous le nom de potentiel, car ces résultats analytiques ne nous paraissent pas avoir beaucoup éclairé la nature des choses. (Voy. le travail de M. Helmholtz.)

est réduite à moitié, on peut donc dire en général que : la boussole permet de mesurer la quantité d'électricité en mouvement.

Réciproquement si, un fil métallique étant placé dans un calorimètre, on emploie la force du courant à échauffer une masse d'eau[1], on trouve que la température est proportionnelle à la longueur du fil et au carré de la déviation de la boussole. Or, dans cette expérience la masse pesante restant constante, la vitesse a dû varier, mais les températures sont proportionnelles aux forces vives acquises par les molécules, et les forces vives sont entre elles comme les carrés des vitesses ; donc ici la boussole mesure un élément dynamique proportionnel à la vitesse du courant, ou, en autres termes, la quantité du flux qui la traverse dans un temps donné. En effet soient t et t', les températures, D et D′ les déviations, on a $\frac{t}{t'} = \frac{D^2}{D'^2}$; mais la masse pesante échauffée restant constante, on a $\frac{t}{t'} = \frac{v^2}{v'^2}$, donc $\frac{D}{D'} = \frac{v}{v'}$.

Nous avons vu un peu plus haut que la boussole mesurait la masse ; par conséquent, elle mesurera le produit de la masse par la vitesse de l'électricité, c'est-à-dire la *quantité* d'électricité qui passe dans un temps donné. D'après cela, la boussole peut être comparée aux instruments employés en hydraulique à la mesure des cours d'eau, dans lesquels, comme dans le pendule hydrométrique, on estime la vitesse du liquide d'après la valeur de l'angle que fait avec la verticale AB une pièce pesante *pi* mobile autour du centre B de l'arc divisé AO (fig. 25). Il en est de même de la balance rheumamétrique[2]. La boussole est analogue aux rhéomètres hydrauliques

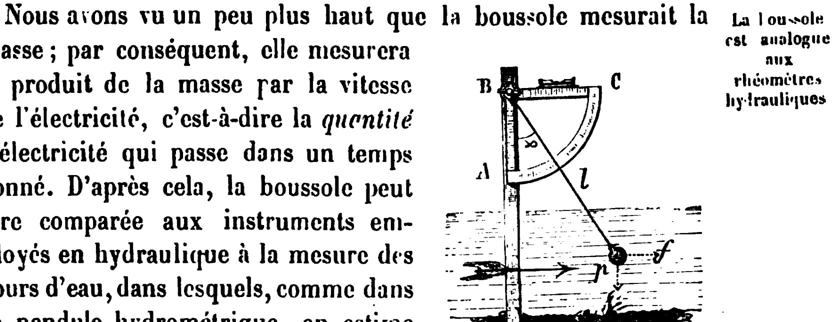


Fig. 25.

[1] On peut employer simplement un fil de platine, immergé dans un vase contenant l'eau, mais il faut alors tenir compte des pertes.

[2] Comme exemple de balance rheumamétrique, on peut citer le rhéomètre de Poletti (fig. 26), dans lequel le cours d'eau agit sur la palette R et incline le fléau BCA. La charge qui, placée en A, rétablit l'équilibre de la barre oscillante, mesure en kilogrammes et fractions de kilogrammes l'énergie du courant. (*Note du traducteur.*)

Le courant est soumis à la loi de continuité des flux.

La deuxième loi relative à l'influence de la section nous montre que le mouvement qui constitue le courant n'est pas la simple vibration thermique de la matière pesante du conducteur, mais un véritable flux de quelque matière, car il obéit à la loi de continuité des fluides. En effet, l'intensité de la force

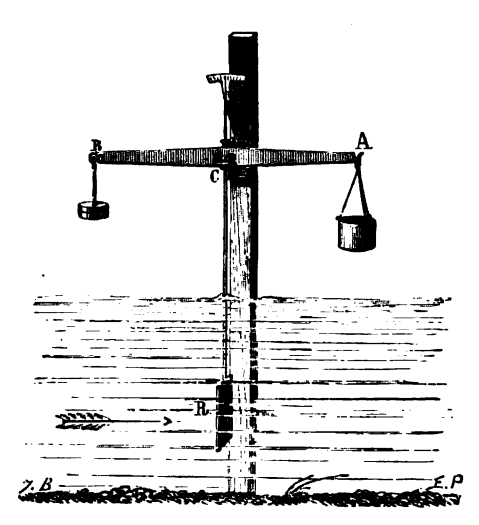


Fig. 26.

vive de la vibration thermique est exprimée dans chacune des sections du fil par $mv^2 = m'v'^2$, d'où $\frac{m}{m'} = \frac{v'^2}{v^2}$, et dans les diverses sections la masse de matière ébranlée étant proportionnelle à l'aire de la section on aura $\frac{m}{m'} = \frac{\omega}{\omega'}$, d'où

$$\frac{\omega}{\omega'} = \frac{v'^2}{v^2}.$$

Les températures étant dans le rapport du carré des vitesses, il en résulte $\frac{t'}{t} = \frac{v'^2}{v^2}$, d'où

$$\frac{\omega}{\omega'} = \frac{t'}{t};$$

c'est-à-dire que si le courant était constitué par une simple vibra-

tion la température devrait être en raison inverse et simple des sections. Mais l'expérience établit que ces mêmes températures sont inversement proportionnelles au carré des sections, c'est-à-dire que nous avons

$$\frac{\omega^2}{\omega'^2} = \frac{t'}{t},$$

donc il est impossible d'admettre l'hypothèse précédente.

Au contraire, si dans la formule

$$\frac{\omega^2}{\omega'^2} = \frac{t'}{t},$$

qui est purement expérimentale, on substitue aux températures le carré des vitesses auxquelles elles sont proportionnelles, on obtiendra l'égalité

$$\frac{\omega'^2}{\omega^2} = \frac{v^2}{v'^2},$$

d'où

$$\omega v = \omega' v',$$

ce qui revient à dire que les vitesses qui animent les molécules sont en raison inverse des sections.

Cette règle est précisément celle qui, formulée par Léonard de Vinci touchant l'écoulement des fluides, est nommée habituellement loi de la continuité ou encore règle de Castelli, d'où il faut conclure que l'électricité se comportant comme les fluides, le courant doit être un véritable flux[1].

A la vérité les vitesses introduites dans la formule indiquée sont les vitesses thermiques, c'est-à-dire les vitesses des molécules du conducteur, et non celles du fluide qui les ébranle; mais comme nous avons prouvé déjà que le simple mouvement oscill toire ne peut constituer le courant, il faut admettre que la vitesse en question est celle d'un fluide qui traverse les molé-

[1] Voy. Lombardini, *De l'Origine, etc.*, *Actes de l'Inst. lombard*, vol. VIII. Dernièrement M. Edlund (*Archives des sciences physiques de Genève*, 15 juillet 1875), partant de cette équation propre aux fluides, il en a déduit la loi des températures. Ce procédé n'est au fond que le nôtre renversé : mais le nôtre est préférable, car nous ne formons aucune hypothèse sur l'électricité comme le fait cet auteur. mais nous sommes conduits par les faits à reconnaître que l'électricité se comporte comme les fluides. Il est très-probable que M. Edlund ne connaissait pas notre démonstration onnée, il y a déjà dix ans.

cules, et les ébranle en leur communiquant une vitesse proportionnelle à la sienne. Nous voilà encore ramené à cette conclusion que la boussole permet de mesurer la quantité de flux électrique qui passe en un temps donné.

Expérience sur les gaz.

On doit à Plüker une belle expérience qui rend sensible à l'œil l'accroissement de l'intensité de la vibration dans les sections étroites. Un tube de Geissler (*fig.* 27) renfermant un gaz extrême-



Fig. 27.

ment raréfié présente deux parties d'inégal diamètre : une grande et une capillaire. Pendant le passage du courant d'induction la partie capillaire devient extrêmement brillante, tandis que, dans la partie élargie, on observe seulement une légère lueur phosphorescente. La couleur et le spectre sont différents pour une même substance dans les deux sections, ce qui prouve une oscillation moléculaire différente. De la Rive, étudiant la distribution de la chaleur au sein de ces tubes, a trouvé qu'elle est soumise aux lois thermiques de la propagation du courant dans les fils ; les deux phénomènes sont donc de même nature, et, pour ne citer qu'un exemple. un tube rempli d'hydrogène raréfié s'échauffe fortement pendant le passage du courant comme le ferait un fil métallique.

Le courant est un véritable flux.

Ces faits nous autorisent à regarder le courant comme un véritable flux de matière traversant le conducteur, flux dont la vitesse croît à mesure que la section diminue ; mais ils ne peuvent nous apprendre si le flux dont il s'agit ici est constitué par de la matière impondérable ou pondérable. Sur ce point, les idées sont

partagées : les uns font du courant un flux de matière impondérable, et alors ils expliquent la lumière et la chaleur voltaïques par le frottement, par le choc du courant éthéré contre les molécules matérielles ; d'autres admettent au contraire un transport soit de la matière même des rhéophores, soit au moins de la matière dont les vibrations engendrent la lumière. Les deux opinions ne sont pas si opposées qu'on pourrait le croire, car comme dans les tubes de Geissler la couleur de la lumière et son apparence spectrale varient avec la nature du gaz raréfié renfermé dans l'enveloppe de verre, il est évident que non-seulement les électrodes, mais aussi la matière qui existe entre les pointes terminales, exerce une action sur le phénomène. De plus on est porté à admettre cette action spéciale en voyant d'une part les tubes se recouvrir à l'intérieur de dépôts plus ou moins épais, et de l'autre les substances qu'on y renferme s'altérer peu à peu. Cependant ces résultats, malgré leur importance, n'excluent pas nécessairement l'intervention de l'éther.

Le courant n'est pas un mouvement vibratoire.

De toutes façons les lois citées plus haut sont inconciliables avec l'hypothèse d'un simple mouvement vibratoire, analogue soit à celui qui, imprimé à la matière pesante, détermine en elle les *phénomènes* de chaleur, soit au mouvement lumineux qui traverse un milieu diaphane absorbant. Au contraire, en admettant le mouvement du flux, on ne nie pas l'existence d'un mouvement vibratoire qui l'accompagne. L'expérience prouve que le transport des fluides n'est jamais séparé des mouvements vibratoires. C'est ainsi que les jets des fontaines sous forte pression sont toujours oscillants; et, mieux encore, si l'on fait passer un courant fluide dans un tube flexible en caoutchouc, en comprimant le tube avec la main, on entend des vibrations continuelles, qui prouvent que le mouvement longitudinal du fluide est accompagné d'un mouvement de vibration. On est donc forcé de reconnaître que, même en admettant que le courant se propage quelquefois par ondulations, celles-ci sont toujours constituées par un véritable flux et par un transport réel.

Relation du flux et des vibrations.

Déjà, dans le livre II, nous avons esquissé une hypothèse utile à rappeler en ce moment. L'onde éthérée, calorifique, avons-nous

dit, lorsqu'elle dépasse les limites d'élasticité du milieu doit se rompre et se transformer en un véritable courant. De cette façon on comprend pourquoi la chaleur et le courant sont toujours en intime connexion, mais en même temps on saisit parfaitement les caractères distinctifs de ces deux genres de mouvements.

Nous pouvons dès maintenant commencer à formuler quelques conclusions théoriques sur les bases établies. Nous savons que, à la matière pondérable se trouve associée l'impondérable : le courant dont nous parlons ne saurait être que le flux de cet éther formant les atmosphères moléculaires qui se trouvent ébranlées au delà de la limite de leur élasticité normale et produisent ainsi un flux véritable. Dans les métaux et les corps conducteurs ce flux se fait avec grande facilité, mais dans les solides isolants il se fait avec une énorme difficulté : de là la propagation lente de l'induction dont nous avons parlé (Ch. I). Dans certaines combinaisons de liquides, surtout quand il y a une liberté assez grande des molécules, il se produit même une séparation des éléments chimiques par suite du dérangement que produit dans les atmosphères ce courant adventice lorsqu'il provient du dehors. Tout cela nous prépare une base pour établir la véritable théorie de cette force. Acceptons pour le présent, ces indications comme une hypothèse provisoire.

Bases de la théorie actuelle.

Objection au système vibratoire.

La théorie, qui fait du mouvement électrique un mouvement vibratoire, ayant été défendue par des physiciens fort distingués, il est bon de montrer toute son insuffisance. Elle ne peut d'aucune façon expliquer comment le mouvement augmente à mesure que la section se rétrécit ; ce fait ne se présentant dans aucun des mouvements vibratoires connus, qu'ils soient longitudinaux comme ceux du son, ou transversaux comme ceux de l'eau et de la lumière. Lorsque ces divers mouvements rencontrent un obstacle qui rétrécit le milieu où ils se produisent, ils se réfléchissent dans la masse du milieu, mais ils ne se pressent pas dans le pertuis ouvert devant eux, ce sont les fluides animés d'un mouvement de transport qui augmentent ainsi de vitesse en traversant des passages étroits. Les ondes longitudinales, les ondes de la mer par exemple, peuvent présenter une augmentation d'intensité lorsque, brisées à moitié, la pression qu'elles exercent est plus grande dans

un sens que dans un autre; mais, par ses conditions spéciales, ce cas se rapproche plutôt des mouvements de translation que des mouvements vibratoires, et nous verrons qu'il peut se rencontrer dans l'écoulement de l'électricité. De même, lorsqu'une barre est chauffée par une source calorifique, on ne voit pas que la température soit plus élevée dans les endroits où la barre est plus étroite. Il en est autrement quand l'échauffement est produit par l'électricité, puisque, comme nous venons de le rappeler, des fils très-fins placés dans le circuit d'un conducteur ordinaire peuvent être rougis et fondus pendant que les gros s'échauffent à peine. Ce fait à lui seul suffit pour montrer la grande différence qui sépare les deux phénomènes.

A la vérité, en étudiant les lois de la propagation de l'électricité dans les conducteurs d'une très-grande longueur, les formules obtenues sont semblables à celles de la propagation de la chaleur; mais 1° les formules sont comparables seulement par quelques points; 2° alors même qu'on se borne à déduire de ces formules les conséquences relatives à la tension, une remarque doit être faite, elles ont été établies, tant pour la propagation électrique que pour la propagation calorifique, en admettant comme principe fondamental que la communication de la force d'élément à élément se fait en raison de l'excès de la charge du premier sur celle du second. Elles sont donc applicables toutes les fois qu'il y a un excès de force, lequel peut résulter soit d'un accroissement de l'intensité du mouvement, soit d'une accumulation de matière. Par conséquent, alors qu'elles nous conduisent à des résultats identiques, cela ne nous apprend rien sur la nature de la force elle-même et ne nous autorise pas à regarder celle ci comme un mouvement vibratoire, les calculs édifiés sur ces idées ne suffisant pas à vérifier les hypothèses qui leur servent de bases. En effet, nous verrons ailleurs que les expériences délicates de M. Blaserna ont mis en évidence pour la propagation de l'électricité des phénomènes qui ne sont pas contenus dans ces formules, basées sur la théorie semblable à celle de la chaleur. Nous exposerons ces faits en détail en parlant de l'induction dynamique.

Objection

Réponse.

Il est impossible d'admettre que le mouvement vibratoire électrique élève la température des conducteurs, de la même manière

Différence avec les corps absorbants.

que la lumière échauffe les corps diaphanes en les traversant, car une telle idée est en opposition avec le fait du renforcement du mouvement à chaque rétrécissement de la section. De plus, s'il en est ainsi, l'absorption devant varier en progression géométrique quand la distance parcourue augmente en progression arithmétique, la température des divers points d'un fil devrait décroître en raison de leur distance à la source ; or, ce résultat ne s'observe pas en général. Et si quelquefois, lors de la fermeture d'un courant, la température n'est point la même dans les différentes sections, cela ne se présente jamais le courant une fois établi. Du reste, les irrégularités du commencement sont faciles à expliquer dans l'hypothèse d'un transport réel de l'éther.

CHAPITRE IV

RECHERCHES SUR LES LOIS DE PROPAGATION DE LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE DANS LES CONDUCTEURS.

Loi des résistances.

Par les recherches précédentes nous sommes conduits à accepter les idées communément reçues sur le courant et à le regarder comme un véritable flux de matière dans le fil conducteur. En effet tous les phénomènes qui accompagnent la propagation des courants trouvent leurs homologues dans ceux observés lors du passage d'un fluide dans un canal. Voici à ce sujet quelques exemples. L'expérience a montré que l'intensité I des courants est toujours en raison directe de la force électromotrice, ou (comme on l'appelle encore) de la tension électroscopique E, et en raison inverse des résistances intérieures R venant de la pile, et extérieures r appartenant au circuit : donc on a

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Lois des sections.

Les physiciens ont admis : 1° que la résistance extérieure croît en raison directe de la longueur du fil et en raison inverse de sa section ; or, quand on détermine les résistances éprouvées par un liquide coulant dans un tube, on retrouve les mêmes éléments

agissant de la même manière, avec la différence cependant que, dans le cas des courants électriques, la résistance est proportionnelle à toute la section, tandis que pour les liquides cette résistance varie avec un terme dépendant du périmètre de la section; différence qui s'explique facilement par la raison que le torrent électrique envahissant non-seulement la surface du conducteur, mais l'épaisseur entière de la masse, éprouve une résistance de la part de toutes les molécules. 2° La résistance n'est pas spécifiquement la même pour les diverses substances, et une différence de section dans l'une est souvent compensée dans une autre par un pouvoir conducteur plus grand; ainsi un fil de platine résiste onze fois plus, et un fil de fer sept fois plus qu'un fil de cuivre. Cette conductibilité plus ou moins grande permet d'obtenir des effets d'égale intensité avec des fils de diamètres inégaux; ainsi un courant capable de porter à l'incandescence un fil de cuivre très-fin mettra en ignition un fil de platine beaucoup plus gros, et tel courant qui échauffera faiblement un fil de cuivre ou d'argent fondra au contraire un fil de platine.

Résistance spécifique.

La chaleur engendrée dans les conducteurs par le courant serait donc le résultat du frottement et de l'agitation déterminés par le flux électrique faisant irruption au milieu des molécules, auquel cas il est indifférent que le courant soit un flux de matière pondérable très-raréfiée ou un flux d'éther. La somme des oscillations accomplies par les molécules est tellement petite que l'on peut considérer la vitesse communiquée comme simplement proportionnelle à la vitesse du courant, dès lors la température qui est le travail effectué sera proportionnelle au carré de cette même vitesse, conclusion conforme aux résultats obtenus par M. Marié Davy[1].

Origine de la chaleur dans les conducteurs.

On peut acquérir des notions très-utiles sur la nature du flux électrique, en étudiant les phénomènes lumineux qui se produisent lors de la disjonction des conducteurs interpolaires d'un appareil électrique. Ces phénomènes étant extrêmement variés, essayons de les ramener à quelques types principaux.

Étude de l'étincelle.

1° Quand une large interruption est établie dans un arc métal-

[1] Voyez *Recherches théoriques*, etc., Marié Davy. Paris, 1862, et Thomson, *Philosoph. transact.*, 1856, page 650, note.

lique dont les extrémités sont en relation d'une part avec les coussins et de l'autre avec les conducteurs d'une machine électrique, on obtient la forme la plus connue de la décharge lumineuse; l'extrémité positive présente une aigrette brillante et l'extrémité négative un point lumineux figurant une étoile. Ces lueurs, examinées par réflexion sur un miroir tournant, ne se montrent pas continues, mais formées d'étincelles très-petites. Dans un milieu extrêmement rare, tel que celui du récipient d'une bonne machine pneumatique ou des tubes de Geissler, la décharge est stratifiée, qu'elle soit produite par un courant volta-électrique ou par un courant d'induction. Enfin, de même avec une bouteille de Leyde la décharge, au lieu d'être simple, est composée d'une série de décharges partielles se succédant sans interruption, de telle sorte que l'on pourrait croire à un mouvement ondulatoire discontinu.

Causes de l'incandescence.

L'incandescence des molécules durant ces phénomènes est causée par l'agitation considérable de la matière, agitation que l'on observe constamment lorsqu'un flux se produit par flots successifs; exemple, la fumée sortant d'une cheminée par bouffées successives; l'eau elle-même lorsque, soumise à de très-fortes pressions, elle se meut par ondes successives comme l'ont montré les observations faites sur les tubes de la conduite d'Alatri, dans lesquels l'eau coule sous une pression de 135 mètres. Or, de même que le courant succède toujours à la tension électrique, ainsi dans un fluide, une veine liquide succède à une pression hydrostatique : les conditions sont donc parfaitement comparables.

Mécanisme de la décharge.

Pendant longtemps on ne comprit rien à la façon dont s'accomplissait la décharge. Elle semblait à première vue une explosion éclatant à la fois sur les deux extrémités des rhéophores, et on la supposait produite par deux fluides en mouvement : le positif et le négatif. Ces déductions étaient erronées, car en réalité l'étude de l'étincelle ne prouve rien autre chose, si ce n'est que la condensation et l'ébranlement de la matière pesante acquiert une plus grande violence dans les parties voisines des extrémités entre lesquelles la décharge jaillit. On peut voir sur les figures de Feddersen[1] que

[1] Gassiot, *Proceedings R. Soc.*, London, vol. XII, p. 338. Feddersen, *Ann. chim. et physique*, octobre 1863.

l'étincelle est compacte à ses deux extrémités et plus large, par suite moins brillante en son milieu. La formation de l'étoile lumineuse au pôle négatif s'explique sans qu'il soit nécessaire de supposer l'écoulement d'un fluide spécial par cette extrémité, la lumière et la chaleur qui s'y produisent peuvent en effet provenir de l'agitation suscitée par le flux électrique positif entrant dans le conducteur par l'extrémité négative.

Expériences illusoires pour le fluide négatif.

Cependant, afin de prouver qu'un fluide sortait à la fois des deux pôles, on citait l'expérience suivante : une décharge électrique étant lancée à travers plusieurs feuilles de papier, on voit les bords du papier renversés les uns vers le pôle positif, les autres vers le pôle négatif. Ces résultats ne prouvent rien en faveur de l'existence d'un fluide négatif, car ils sont dus à l'expansion de l'air ou des substances vaporisées qui se sont dilatées dans tous les sens. On a observé qu'une plaque de matière molle, percée par un boulet, présente des bords renversés dans le sens opposé à la direction suivie par le boulet en pénétrant dans la masse. Nous avons vu souvent dans l'expérience du crève-vessie, les bords de la membrane renversés en sens inverse du mouvement de l'air qui rentre dans le manchon de verre ; et nous avons encore pu constater des phénomènes de ce genre sur les tubes de cuivre d'une machine hydraulique aspirante qui furent brisés par l'effet de la pression atmosphérique. Ainsi le renversement symétrique qu'on observe dans les feuilles traversées par l'étincelle ne prouve pas nécessairement l'existence du fluide négatif.

Décharge interpolaire du courant.

2° Avec les courants électriques on produit des effets semblables à ceux des décharges de la bouteille de Leyde, seulement il y a des différences dans l'intensité et la continuité. Aussitôt que dans un circuit on établit une solution de continuité, les deux extrémités du fil manifestent une tension électroscopique, mais il n'y a pas élévation de température. Cette tension est si faible qu'elle ne peut vaincre la résistance d'une mince couche d'air interposée ; toutefois Gassiot employant des piles de 6,000 à 3,000 couples, l'étincelle jaillit spontanément malgré un écartement très-appréciable des fils conjonctifs. Lorsqu'on opère sur les piles ordinaires, on peut suppléer à la trop faible tension initiale par divers moyens ;

ainsi on obtient l'étincelle sans amener les rhéophores en contact, en les faisant traverser préalablement par la décharge d'un condensateur ordinaire, ou bien encore en plaçant à une distance convenable l'une de l'autre les pointes terminales du fil conducteur au milieu d'une flamme. Une fois que le flux électrique a franchi l'intervalle des deux pointes, il continue à passer, parce que le milieu interpolaire est rendu conducteur par la dilatation graduelle que lui fait éprouver l'élévation de température résultant du passage du courant. Il est reconnu en effet que les milieux très-dilatés laissent passer facilement les décharges, alors même que la distance des extrémités polaires est assez considérable, et, pour ne citer qu'un seul exemple, dans les expériences sur la lumière électrique, on s'est assuré que la résistance de l'espace compris entre les charbons égalait environ la moitié de la résistance du circuit tout entier, valeur de beaucoup inférieure à celle d'une égale couche d'air dans les conditions ordinaires. En outre, l'arc lumineux se modifie incessamment, car il suit les mutations du courant, à la façon d'un rhéostat véritable réglant le mouvement de la pile, de façon à ce que la même quantité d'électricité traverse constamment les charbons, mais en produisant une moindre lumière et un arc voltaïque plus court lorsque l'intensité de la source électrique diminue[1].

Conductibilité des gaz chauffés.

Transports entre les pôles du courant

3° Pendant la décharge obscure et silencieuse à travers des liquides séparés par des diaphragmes poreux, il s'accomplit un transport des liquides du pôle positif au pôle négatif; de même dans la décharge lumineuse il y a constamment transport de matière d'un pôle à l'autre, mais avec une prédominance marquée en faveur du mouvement positif. En soumettant l'étincelle voltaïque à l'analyse spectroscopique, on trouve qu'elle fournit toujours les mêmes résultats, quelle que soit la nature du métal employé comme pôle négatif, tandis qu'il n'en est pas de même lorsque le pôle positif vient à changer; donc le transport et la volatilisation des substances s'effectuent surtout au pôle positif. A ce pôle, non-seulement la lumière est plus intense, mais le maximum d'éclat se produit dans la direction du courant; semblable chose arrive pour

[1] Voyez dans le *Nuovo Cimento*, vol. IV, notre *Mémoire sur la lumière électrique* page 49.

le son, il présente une plus grande intensité dans la direction de l'explosion. Toujours est-il qu'on observe quelquefois un transport dans le sens négatif, soit dans les décompositions chimiques, soit dans les expériences d'incandescence, mais ces phénomènes peuvent être rapportés à une volatilisation de la substance opérée par le courant positif lui-même.

Il ne faut pas oublier de signaler parmi les phénomènes propres à nous éclairer sur la nature du flux électrique l'observation suivante : les particules transportées conservent la forme des corps dont elles ont été détachées, et en elles dessinent les contours sur la surface des conducteurs qu'elles traversent. Semblable chose arrive aux veines fluides lancées avec une grande vitesse. Enfin chacun connaît les empreintes laissées par la foudre. Fusinieri, qui a étudié tous ces faits avec grand soin, croyait avoir démontré le transport de la matière pondérable à des distances sensibles suivant des lignes obliques, même à travers les métaux, d'où il avait conclu que l'étincelle n'est pas exclusivement formée par l'éther en vibration, mais que la substance des extrémités polaires amenée à une véritable incandescence en fait aussi partie constituante, et la spectroscopie lui a rendu raison. Veine électrique.

4° La décharge de la pile n'est pas rigoureusement continue. Dans les tubes de Geissler la lumière est stratifiée. Gassiot, avec une pile à eau de 3,000 couples, a obtenu une lumière sensiblement continue lorsqu'il n'y avait aucune résistance intercalée dans le circuit; mais en interposant une couche d'eau, aussitôt les stratifications apparaissaient. Ajoutons que, même dans les cas où l'étincelle électrique nous paraît continue à la simple vue, on peut cependant s'assurer du contraire à l'aide d'un miroir tournant. Feddersen a constaté sur les batteries de Leyde que si la résistance diminue, le trait lumineux devient continu, du moins en apparence, parce qu'alors les lignes de décharge se multiplient de telle sorte que la discontinuité des explosions partielles successives se compensant mutuellement, l'ensemble paraît continu; la même observation s'applique également aux piles. D'après ce physicien, au commencement de la décharge jaillit une étincelle très-étroite qui établit la continuité du circuit, ensuite apparaissent les pulsations. Ces phénomènes se modifient beaucoup dans

Le courant procède par ondulations.

le cas des courants induits, comme nous le verrons plus tard.

Tous les faits précédents prouvent que le courant procède par ondulations analogues à celles qui se forment dans toutes les veines fluides lancées avec force ou dans les courants liquides lorsque, rencontrant un obstacle, ils produisent pour le vaincre des poussées qui se superposent. De cette façon l'explication du bruit de la décharge devient facile ; ainsi examinons l'arc voltaïque : à mesure que les charbons interpolaires se rapprochent, ils font entendre un sifflement plus aigu, et en même temps la lumière devient plus riche en ondes courtes et fluorescentes, preuves évidentes d'une certaine discontinuité non-seulement dans l'air dont la vibration produit le son, mais aussi dans les pulsations qui donnent naissance à la lumière.

Dans les milieux raréfiés, en expérimentant à l'aide des courants d'induction, on voit le pôle négatif s'échauffer plus fortement que le pôle positif, bien qu'il reste obscur[1]. Mais ces phénomènes ne sont pas constants, et comme il se surajoute des phénomènes d'induction, ils appartiennent à des cas plus complexes.

Résumé.

En résumé, du pôle positif s'échappent les particules entraînées par le courant, et c'est lui qui présente l'éclat le plus intense et la plus grande longueur de jet lumineux ; au pôle négatif, on constate toujours une moindre intensité et une diffusion latérale très-marquée. Ces conclusions sont seulement valables pour le cas des courants volta-électriques, en dehors de tout phénomène d'induction. Donc le *courant électrique est un flux qui réellement se dirige du pôle positif au pôle négatif.*

Passage par le vide.

Revenons un instant sur un fait déjà signalé au premier chapitre. Gassiot a constaté, avons-nous dit, qu'il est impossible de faire passer la décharge électrique à travers le vide absolu. Mais pour obtenir ce vide complet, les précautions les plus délicates sont nécessaires ; non-seulement il ne faut laisser dans les récipients la moindre trace de substances gazeuses, il faut également renoncer aux mastics ordinaires. Plusieurs fois de suite on remplit des tubes en verre avec de l'acide carbonique ; puis, après avoir épuisé ce gaz, autant que possible à l'aide de la machine pneumatique, on absorbe les dernières quantités restantes avec la

[1] De la Rive, *Mondes*, 1863, p. 275.

potasse; or, si les tubes éprouvent une très-faible élévation de température, immédiatement courant et lumière les traversent, parce que, sous l'influence de la chaleur, les matières solides ont dégagé des traces de vapeurs. Cette très-remarquable expérience nous apprend que là où le courant passe la matière pesante doit exister; mais en conclure que l'élément impondérable, tel que nous l'avons défini, ne prend aucune part à la transmission du courant, c'est assurément aller au delà des faits qui ne prouvent en rien l'impossibilité d'une telle intervention. Du reste, admettons que les expériences faites jusqu'ici dans le but de constater le pouvoir isolant du vide soient parfaitement concluantes; cela montrerait seulement que le vide ne transmet pas les mouvements longitudinaux tels qu'on les conçoit dans le courant, et qu'il transmet au contraire les mouvements transversaux de la lumière. En cela, le vide ne serait pas différent des autres corps transparents. Par contre, dans l'intérieur des corps pondérables et spécialement des métaux, l'éther serait susceptible à un degré plus ou moins prononcé de vibrer longitudinalement. Voilà pourquoi la présence de la matière est une condition nécessaire au passage du courant. Certains savants prétendent qu'elle est aussi insuffisante, et que l'éther ne prend pas part au phénomène. Dans cette hypothèse il reste toujours à expliquer quelle est la force assez puissante pour lancer un flux de matière avec une violence capable de surmonter tous les obstacles, et à montrer comment, si le courant est exclusivement constitué par la matière pondérable, on peut concevoir l'origine de l'énorme vitesse dont elle est animée. Cette vitesse est évidemment de l'ordre de celle de la lumière, comme nous verrons plus tard. Or aucune expérience ne prouve que la matière pondérable est capable d'une telle vitesse surtout dans la propagation du mouvement vibratoire. Cette vitesse dépendant de l'élasticité du milieu, nous n'avons aucun exemple d'une élasticité capable de produire de telles vitesses : donc, même de ce côté, nous sommes assurés que l'électricité n'est pas un mouvement vibratoire de la matière pondérable. Quant à être un effet de sa projection il faut en assigner une cause capable de la produire. Or la force répulsive, mise en jeu dans ces circonstances, surpasse de beaucoup en énergie celle qui produit l'évaporation

et la sublimation des solides, car les phénomènes de ce genre sont fort différents des manifestations électriques. Fusinieri lui-même reconnaissait la dissemblance des deux agents que nous comparons, puisqu'il nommait le premier : « calorique natif. »

En étudiant l'origine du courant, nous verrons clairement pour quelle part la matière pesante et l'éther entrent chacune dans son développement[1].

Conclusion. Comme conclusion de ce chapitre, nous dirons que le courant est certainement un flux de matière circulant dans le fil rhéophore du pôle positif au pôle négatif. Mais est-ce un flux de matière pondérable, ou d'éther? Nous avouons qu'il peut encore rester quelque doute sur cette question, et pour y répondre sans incertitude, il nous faut recourir à un autre genre d'observations.

CHAPITRE V

DE L'ORIGINE DU COURANT DANS LA PILE.

La pile, machine en travail. Nous pouvons regarder une pile dont le circuit est fermé comme une machine en activité dans laquelle, ainsi que dans toute machine arrivée à l'état de mouvement uniforme, il s'établit un équilibre complet entre le travail exécuté par la puissance motrice, en agissant sur les organes récepteurs de la machine, et le travail passif ou la résistance surmontée par l'outil. Le premier travail s'accomplit dans le rhéomoteur lui-même, le second dans le circuit interpolaire. L'altération chimique des substances nécessaires à la construction de l'électro-moteur est la véritable source du travail actif; autrefois cette activité était attribuée au contact des éléments, et il se peut que cette condition soit favorable, et même

Source du travail actif.

[1] Voir Fusinieri, *Annales des sciences du royaume lombard-vénitien*, tome III, page 38, etc. — Ce physicien, le premier, eut le courage de se déclarer contre les impondérables et les forces métaphysiques, ses travaux précédèrent donc de plusieurs années ceux des physiciens modernes. Son langage un peu trop violent lui suscita de nombreux adversaires, mais il témoigne toujours d'une conviction profonde, et nous devons ajouter qu'un grand nombre de ses opinions ont été confirmées par les recherches ultérieures. De son temps, la vraie théorie de la lumière n'était pas faite encore; aussi tomba-t-il dans des exagérations malheureuses. Néanmoins son nom mérite d'être compté parmi ceux des fondateurs des théories nouvelles.

nécessaire à la circulation de la matière, mais il ne saurait être principe de force vive, car quelque chose naîtrait du néant. Pour nous servir d'une comparaison qui n'est pas hors de propos dans le cas actuel, le fait du contact peut être comparé à l'action par laquelle on met en communication deux réservoirs d'eau de niveau différent; l'ouverture de la vanne est absolument nécessaire, mais on aurait tort de croire que cela produit l'écoulement du fluide d'un réservoir dans l'autre ; ce dernier phénomène est dû à la gravité. Même dans la pile, la communication de contact est une condition par laquelle la puissance différentielle des états électriques entre en activité. Le travail de la pile, soit actif, soit passif, peut être thermique, mécanique ou chimique ; dans le présent chapitre, nous traiterons de ce dernier.

Aucun des corps composés de la nature, convenablement traité, ne peut résister à l'action décomposante du courant; aussi la chimie est-elle en grande partie redevable à la pile des nombreuses découvertes qui, depuis ces dernières années, lui ont fait subir une rénovation complète. Si les substances à décomposer par le courant voltaïque sont liquides, on les soumet directement à l'action de la pile, et si elles sont solides, on les dissout ordinairement dans un liquide non isolant, l'eau par exemple. Force décomposante du courant.

On doit étudier l'action chimique d'une pile dans deux conditions parfaitement distinctes, ou bien : 1° elle s'accomplit sur le trajet extérieur du courant, ou bien, 2° au sein de l'élément voltaïque lui-même.

Commençons par l'action extérieure. La puissance électrolytique d'un courant se mesure en déterminant la quantité des éléments séparés pendant la décomposition des corps ; ainsi l'évaluation des volumes d'oxygène et d'hydrogène fournis par la décomposition électrochimique de l'eau permet souvent d'établir une comparaison entre les intensités chimiques des divers courants. Dans le cas où les éléments isolés ne sont pas gazeux, il suffit d'estimer le poids de l'un d'entre eux ; par exemple, le poids du métal déposé pendant la réduction voltaïque du sulfate de cuivre. Mais lorsqu'on a recours à ce mode de mensuration, les auteurs recommandent, avec raison, d'user des précautions les plus minutieuses. Car il faut que le travail exécuté soit seulement chimique. On se tromperait Travail extérieur de la pile.

par exemple en mesurant la force d'une pile très-énergique de Bunsen de cinquante éléments par la quantité de gaz d'eau décomposée dans un voltamètre à petites lames. Le courant échauffe la masse violemment, produit des lueurs et des étincelles visibles à l'œil, et conséquemment toute la force du courant n'est pas employée dans l'électrolyse.

Lois électro-chimiques. L'expérience a fourni sur les actions électro chimiques quelques données générales, parmi lesquelles nous citerons la loi suivante, à cause de sa grande importance :

La puissance chimique d'un courant est proportionnelle à son intensité magnétique mesurée avec la boussole, et dans tous les points du circuit elle a une valeur constante. Cette loi établit entre les deux actions électriques différentes une relation, telle que l'une peut être substituée à l'autre. Les deux phénomènes sont parfaitement parallèles; ainsi en partageant un courant entre deux galvanomètres, on observe des déviations, dont la somme est égale à l'angle d'écart mesurant l'intensité du courant total; de même, en partageant un courant entre deux voltamètres égaux, la somme des éléments séparés représente la quantité obtenue dans un seul appareil traversé par le courant tout entier, abstraction faite bien entendu des résistances et autres influences secondaires.

Lorsqu'on évalue l'intensité de l'action chimique, il est nécessaire de tenir compte du temps : ainsi, deux courants sont égaux lorsqu'ils décomposent des quantités égales d'une même substance dans le même temps; un courant est double d'un autre si dans un temps donné il décompose une quantité double de substance, etc. La résistance, ou conductibilité, du milieu au sein duquel l'action électrolytique s'accomplit, n'exerce d'autre influence que d'augmenter ou de diminuer la quantité totale d'électricité mise en circulation, comme on peut s'en assurer à l'aide de la boussole. L'intensité de l'action chimique est constante dans toutes les sections du circuit; elle reste aussi la même dans les points pris à l'intérieur de la pile elle-même, et cela indépendamment du travail qui peut s'accomplir dans les autres parties; par conséquent, les choses se passent encore ici de même que dans les actions électro-dynamiques.

Avant d'aller plus loin, disons quelques mots de l'action chi-

mique à l'intérieur de la pile, puis nous reviendrons à l'action extérieure et nous chercherons les relations entre les deux genres d'effets. Travail intérieur de la pile.

La disposition des couples électro-chimiques varie à l'infini, car on peut les former avec des métaux et des liquides fort différents les uns des autres ; mais tous les couples ne se prêtent pas avec la même facilité aux recherches théoriques, parce que dans un grand nombre d'éléments se produisent des réactions secondaires qui compliquent la régularité de l'effet principal. En faisant abstraction de ces influences perturbatrices et en opérant sur des substances convenablement choisies, on a trouvé que *l'action décomposante d'un courant est la même dans chacune des cellules de la pile et dans les diverses parties des rhéophores ;* si bien que le volume d'hydrogène mis en liberté dans un élément est égal à celui recueilli dans un voltamètre traversé par le courant de cet élément. On obtient des résultats parfaitement nets à l'aide d'un couple formé soit avec du zinc distillé, ou tout au moins amalgamé, et de l'acide sulfurique, soit avec du platine platiné et le même acide. Dans plusieurs dispositions voltaïques cette loi ne se vérifie pas, on attribue les exceptions à des actions locales.

Supposant nulle toute espèce d'actions locales et la surface des couples égale pour tous les éléments d'une pile, il résulte de la loi énoncée ci-dessus que la somme d'électricité mise en mouvement dans une pile est proportionnelle au nombre des éléments ; mais à mesure que les cellules deviennent plus nombreuses, les résistances présentées par les couches liquides de ces mêmes cellules croissent d'une égale quantité, si bien que la quantité du courant mis en circulation est indépendante du nombre des éléments. Afin de comprendre comment plusieurs couples, sans accroître le courant, permettent d'obtenir certains effets impossibles à réaliser avec un seul, il est bon d'examiner l'état virtuel du courant et de définir ce que l'on entend par force électro-motrice. Quantité et tension.

Lorsque, dans un élément de pile électro-chimique les métaux étant plongés dans le liquide destiné à les recevoir, on ne réunit pas les électrodes, les plaques ne sont plus à l'état naturel et manifestent une certaine tension électroscopique. Volta et les physi- Force électro-motrice.

ciens de son époque se contentèrent d'étudier la pile dans ces conditions, et la valeur de cette tension électroscopique constitue, à proprement dire, ce que l'on appelle depuis lors la force électromotrice. Son intensité varie avec la combinaison adoptée; ainsi, représentant par 1 000 celle du couple Daniell, celle du couple Bunsen sera 1 500 et ainsi des autres[1]. L'intensité effective d'un couple, c'est-à-dire la déviation galvanométrique, ou la quantité de décomposition électro chimique qu'il peut produire, est directement proportionnelle à cette tension, et en raison inverse de la résistance intérieure, elle est donc représentée par

$$I = \frac{E}{R}.$$

Si dans l'intérieur de l'élément on intercale une résistance étrangère à cet élément, par exemple un fil ou un voltamètre d'une *valeur réduite r*, l'intensité deviendra[2]

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

On voit par là que si on multiplie les couples alors que r est nul, I ne variera pas; car

$$\frac{n.E}{n.R} = \frac{E}{R}.$$

Influence du nombre des couples. Mais au contraire la multiplicité des couples aura un grand avantage dans le cas d'une résistance additionnelle; car la formule de l'intensité sera

$$I = \frac{nE}{nR + r} = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}.$$

et alors la valeur de r exercera une influence d'autant moindre que le nombre n sera plus grand.

La tension électroscopique d'une pile est l'élément essentiel de sa puissance, et la pile présente sur toutes les sources électriques

[1] Les recherches faites sur ce point sont nombreuses; nous citons ici les nombres qui résultent d'expériences personnelles faites en 1856. *V. N. Cimento*, vol IV. Ces valeurs varient avec la force des acides; du reste les nombres trouvés par nous diffèrent peu de ceux obtenus par les autres.

[2] Par valeur *réduite* on entend celle qui est exprimée à l'aide de l'unité de résistance adoptée. Dans les déterminations de ce genre, il ne suffit pas de tenir compte de la longueur des fils métalliques, mais encore de leur température, ainsi que nous

connues l'avantage de pouvoir reconstituer sa tension en un intervalle de temps très-court. Cependant, sous ce rapport, sa puissance n'est pas infinie ; tous ceux qui se sont occupés de télégraphie le savent parfaitement. Ainsi une pile Bunsen recouvre sa tension plus rapidement qu'une pile de Daniell, et celle-ci plus vite qu'une pile à eau simple.

Il importe, pour l'objet du présent travail, de déterminer au juste en quoi la tension électroscopique d'une pile se différencie du courant né de la même pile.

Analogie de la tension avec la pression.

Évidemment, entre ces deux conditions électriques, le rapport est en tout comparable à celui que l'on reconnaît en hydraulique entre une pression hydrostatique et un flux ; car la tension d'une pile cesse aussitôt que le courant commence, et s'il en reste une certaine quantité, cela dépend de la résistance du circuit, le tout se passe exactement comme dans l'écoulement des liquides, au quel cas il reste dans le réservoir une pression réglée par la résistance de la conduite. Le rapprochement que nous faisons ici d'une part entre la tension électrique et les pressions hydrostatiques, et d'autre part entre l'écoulement des fluides pesants et le *mouvement* qui constitue le courant électrique, nous oblige à bien déterminer quelle signification il faut donner aux mots tension et pression.

Généralement on entend par tension une condition de forces destinées à produire un certain effet qu'elles ne parviennent pas à accomplir par le fait d'une résistance antagoniste. Telle est la définition communément acceptée ; par conséquent, il est aisé de voir que le mot tension n'est autre qu'une de ces nombreuses expressions métaphoriques qui procèdent du sentiment intime de l'activité et de la personnalité humaine. Souvent, en effet, il nous arrive de faire un effort en vue de réaliser un certain effet et nous n'obtenons pas le résultat désiré, néanmoins nous avons parfaitement conscience de notre tension musculaire. Or il ne se passe rien de semblable dans les corps inanimés.

l'avons indiqué dans un travail ayant pour titre : *On Electrical Rheometry*, publié dans les *Smithsonian Contributions*, de 1819.

La tension peut se déterminer dynamiquement soit avec la formule en intercalant une résistance r, soit à l'aide de l'électroscope.

La quantité E paraît être en réalité la mesure de la tension ou énergie virtuelle de ce qui constitue le mouvement électrique. (Voir *Mémoire sur la lumière électrique*, page 69.)

Analyse de la tension.

En analysant soigneusement les circonstances dans lesquelles nous admettons une tension ou une pression, nous n'y trouvons pas autre chose qu'un mouvement ou une disposition au mouvement, et par disposition au mouvement il faut entendre un état d'inertie, une sorte d'état passif de la matière qui ne constitue nullement une véritable tendance, si nous donnons à ce mot sa signification habituelle. Là où il y a tendance, on trouve toujours un mouvement que nous disons virtuel ou potentiel. Or le virtuel, le potentiel sont des idées abstraites, de pures conceptions subjectives, ne correspondant à aucune réalité dans la nature. L'observation nous apprend une seule chose, c'est que les circonstances dans lesquelles nous admettons un mouvement virtuel supposent toujours un mouvement véritablement actuel, mais qui se différencie de celui que nous appelons ainsi communément, parce qu'il n'y a pas alors déplacement appréciable à nos sens d'une masse, tandis qu'au contraire, dans le mouvement dit actuel il y a translation apparente d'une masse. Lorsqu'on n'observe pas le transport d'une masse, il y a en général ou un mouvement intérieur de vibration dans le corps lui-même, ou bien un autre corps le pousse en vertu d'un pareil mouvement, mais le mouvement de déplacement est empêché par une cause antagoniste ; celle-ci venant à cesser, aussitôt la première traduit son effet d'une façon plus ou moins apparente. Toute pression ou tension suppose deux forces contraires en présence, et les forces se résolvent en mouvement de la matière. Ce mouvement restera oscillation ou vibration dans l'état de tension et deviendra translation aussitôt que l'une des forces antagonistes cessera son action. Ainsi, dans une chaudière à vapeur fermée il y a tension ; cette tension n'est que le mouvement vibratoire des gaz : que la soupape soit soulevée ou que les parois éclatent, et la vibration devient aussitôt projection. On a coutume de dire qu'alors le mouvement virtuel ou potentiel se traduit comme mouvement actuel ; mais on voit qu'il y avait déjà un mouvement réel et actuel quand la chaudière était fermée.

Tension calorifique.

Cette remarque peut s'appliquer à tous ces cas de la nature. Ainsi l'étude de la chaleur nous a prouvé que toutes les molécules des corps sont dans une continuelle agitation ; par l'effet de leur

réaction réciproque, les molécules devraient donc être projetées au loin et concevoir un mouvement de translation, mais elles en sont empêchées par des actions contraires, lesquelles sont, par exemple, la gravité d'une masse ou le poids, la cohésion moléculaire, etc. Ainsi dans le cas cité ci-dessus le mouvement existe non-seulement dans la matière fluide du gaz, mais encore dans la matière solide des parois, qui quoique renfermée dans des parois géométriques par les actions moléculaires, qui constituent un espace borné, ne cessent pas cependant de vibrer et de repousser constamment le choc et la masse fluide intérieure. La seule différence entre la vapeur et la paroi de la chaudière est que les molécules de la première possèdent une translation sans autres bornes que celles des obstacles qu'elles rencontrent, pendant que celles de la chaudière sont bornées par ces actions qui constituent la cohésion moléculaire. Nous ignorons complétement le mécanisme de ces actions, au moins pour la plupart, et de là vient la difficulté de se rendre compte des phénomènes d'une manière satisfaisante. Toutefois ces *forces résistantes* doivent nécessairement se résoudre en un mouvement puisqu'elles sont capables d'équilibrer un mouvement. La manière de voir que nous exposons actuellement est générale et fondamentale, de plus elle est une conséquence nécessaire de la théorie mécanique de la chaleur. A la vérité elle renverse toutes les idées reçues jusqu'à ce jour, et nous oblige à donner un sens précis à une multitude de locutions purement conventionnelles qui ont cours en mécanique rationnelle. Une pareille considération ne doit pas nous arrêter; avec le temps on reconnaîtra certainement combien il est nécessaire dans l'explication des phénomènes d'employer les mots tension ou pression avec la signification précise que nous leur avons assignée. Non que nous voulions réformer sur ce point le langage scientifique ; car pour la rapidité du discours certaines expressions conventionnelles méritent d'être conservées; mais il faut bien se garder de voir dans ces mots autre chose que des locutions commodes pour éviter la confusion que la multitude des paroles apporte.

Donc, tous les corps à l'état de tension présentent un mouvement de vibration duquel dérive une sorte d'équilibre dynamique,

Toute tension suppose un mouvement actuel.

c'est-à-dire d'équilibre entre actions contraires et égales. Le rôle du physicien consiste à reconnaître dans chaque cas particulier la nature des causes sollicitantes et à les réduire à des modalités de mouvement.

Pour rendre notre pensée plus claire, nous aurons recours à une comparaison. Peut-être présente-t-elle l'inconvénient d'être choisie hors du sujet et d'en donner une idée un peu vague; néanmoins nous la croyons utile. Considérons deux animaux qui luttent ensemble: si leurs efforts s'entre-détruisent exactement, aucun des deux ne change de position. Or cet état d'équilibre est fort différent de celui que présenteraient ces mêmes animaux s'ils étaient simplement appuyés l'un contre l'autre ; à cela nul ne se méprendra. Les fortes saillies que dessinent leurs muscles, l'exagération de leur chaleur naturelle, la sueur qui inonde leur corps et un grand nombre d'autres particularités montrent clairement que dans l'organisme de chacun des combattants il se produit un violent travail. Cependant une personne qui ne donnerait nulle attention à toutes ces manifestations, pourrait croire les deux adversaires en repos. Que si l'un des animaux ne soutient pas son travail intérieur, immédiatement l'autre prend l'avantage et lui fait perdre la position dans laquelle il se maintenait. Ainsi le mouvement de tension se transforme en translation aussitôt que le travail de l'un surpasse celui de l'autre.

Application à l'électricité.

Quittons maintenant les généralités et appliquons ces idées au cas particulier des phénomènes électriques. En examinant une pile dont les rhéophores ne sont pas réunis, nous voyons le mouvement moléculaire qui se dégage dans l'intérieur de l'électro-moteur au sein duquel il prend une direction déterminée, être arrêté au niveau de l'interruption du circuit : d'où tension aux deux extrémités polaires. Cette tension statique est nécessairement accompagnée d'un mouvement : il y a donc là condensation ou raréfaction d'éther et, de plus, une vibration comme dans la chaleur ou l'action soit mécanique soit chimique de laquelle la tension dérive. Le mouvement vibratoire exagéré qui envahit les deux pointes terminales ne pouvant revenir en arrière (au moins dans sa totalité), trouble le milieu ambiant, lequel ne peut rester neutre et doit être changé dans sa condition d'équilibre par cette exagération de la vibration

moléculaire. La modification du milieu se manifeste par les phénomènes que nous observons dans l'espace affecté par la tension électrique et qui consistent en attractions et en répulsions.

Lorsque cette vibration effective atteint une intensité suffisante, elle devient capable de se frayer un passage à travers le milieu résistant et quand elle y a réussi, alors l'état de tension cesse aussitôt complétement et il se développe en même temps un mouvement particulier de transport qui est le courant.

Tel est le seul moyen rationnel de donner de la tension électrique une explication conforme à la théorie des phénomènes calorifiques, avec lequels les effets de tension présentent une étroite analogie et de nombreux points de contact. Après que nous aurons examiné soigneusement le mode d'action d'une pile dans ses moindres particularités, nous reconnaîtrons encore mieux qu'il n'est pas possible de comprendre les choses autrement, car nous verrons que la tension statique de la pile est effectivement proportionnelle aux résistances que le courant doit surmonter dans son trajet.

Nous ne dissimulons pas que jusqu'ici on a éprouvé une difficulté réelle d'abord à se faire une idée nette du changement qui s'opère dans la condition du milieu soumis à l'influence des corps électrisés, ensuite à concevoir en quoi consistent les états électriques particuliers que l'on distingue en appelant l'un positif, l'autre négatif; enfin il n'est pas facile de déterminer comment s'effectue le mouvement de translation électrique appelé courant. Sur tous ces points la lumière ne pourra se faire que lorsqu'on aura étudié et discuté l'ensemble des phénomènes électriques connus, en se plaçant au point de vue nouveau que nous venons d'indiquer ici, le seul qui permette de les interpréter mécaniquement. Difficultés dans cette matière.

Poursuivons donc notre tâche avec persévérance et sans nous laisser distraire par des théories prématurées; mais aussi sans renoncer à aucune des idées en possession desquelles nous ont mis nos recherches précédentes.

Considérons, pour plus de simplicité, comme sujet de démonstration une disposition exempte autant que possible d'actions secondaires, une pile de Smée, par exemple, faite avec du platine pla- Analyse de la pile Smée.

tiné et du zinc amalgamés; nous constatons l'existence d'une forte tension aux deux pôles, avant l'instant où ils sont réunis à l'aide d'un conducteur; de plus, les tensions polaires sont d'un signe différent. Assurément cette tension électrique permanente sur un assemblage de corps conducteurs, tels que ceux employés à la construction d'une pile, est un phénomène singulier et tout à fait différent de ceux qui nous sont présentés par l'électricité statique. En effet, l'équilibre de tension pourrait se rétablir facilement à travers la pile elle-même, formée tout entière de substances conductrices, et cependant ce retour n'existe pas. Les premiers physiciens avaient raison de s'étonner en voyant les deux modalités électriques opposées coexister aux extrémités d'un même conducteur. Aussitôt le circuit fermé, la tension disparaît, la circulation électrique commence et avec elle l'évolution des gaz dans l'appareil; de plus, on peut régler l'intensité du mouvement circulatoire en donnant au fil conjonctif une longueur plus ou moins grande, à peu près comme on règle le flux d'un liquide en le dirigeant à travers des tubes de longueur et de résistance différentes.

Phases du travail.

Un tel fait donne lieu à des remarques importantes au point de vue théorique en raison des phases qui le constituent. En effet : 1° La tension électrostatique des plaques avant la fermeture du circuit nous montre que déjà, à ce moment, l'action électrique consiste dans une condition de la matière qui a quitté son état d'équilibre, et qui ne peut y rentrer que par l'action chimique elle-même, celle-ci restant incomplète pour ainsi dire, et exigeant, pour continuer ses effets, que l'on établisse une communication polaire à l'aide d'un arc conducteur. 2° La tension électrostatique dépendant de la nature de l'élément négatif du couple (cuivre, platine, charbon, etc.), nous devons en conclure que ce dernier exerce une certaine influence et que son action n'est pas exclusivement celle d'un simple conducteur comme le soutiennent certains physiciens. Produit-il une action chimique contraire, ou bien agit-il d'une autre manière? On l'ignore, mais assurément il joue un certain rôle. 3° S'il est possible de graduer le courant en faisant varier la longueur du fil conjonctif, on voit qu'il ne peut se produire dans le liquide intérieur d'une pile une

action supérieure à celle que permet la résistance du fil lui-même; l'effet maximum serait donc obtenu avec un fil extrêmement court ou mieux encore nul, c'est-à-dire en mettant les éléments en contact immédiat, molécule à molécule, et c'est là précisément les conditions des molécules matérielles pendant une combinaison chimique. Aussi n'est-ce pas sans raison que Faraday a défini le courant *une action chimique en circulation*, et de plus, d'après nous, l'action voltaïque montre sur une vaste échelle, et dans des limites accessibles aux mesures, la série des phénomènes qui s'accomplissent au sein des corps hétérogènes mis en présence au moment où ils entrent en combinaison.

Ainsi, la détermination de la nature et de l'origine du courant électrique est ramenée au problème de l'origine de l'action chimique; néanmoins il est bon de dire que, relativement au courant, l'action chimique *latius patet*. En effet, dans certaines combinaisons entre corps matériels, l'action chimique est à la vérité transmise tout entière par l'arc conducteur, et par suite elle ne peut avoir lieu en l'absence de cet arc; mais, dans d'autres circonstances, les choses se passent tout autrement; ainsi, pendant que dans certaines combinaisons l'action chimique peut être mesurée par l'électricité, développée dans telle autre au contraire cette mesure est impossible[1]. M. Helmholtz paraît disposé à donner raison de toutes ces anomalies par la polarisation des lames constituant la pile. Mais qu'est-ce que cette polarisation[2]? M. Helmholtz ne l'explique pas, pas plus que les forces attractives sur lesquelles il fonde ses formules. Elles n'éclairent pas la quesion. Cependant on peut résumer ses savantes discussions sous un point de vue

Le courant réduit à l'action chimique.

[1] On trouvera une série d'expériences à l'appui de cette assertion dans le mémoire déjà cité sur la lumière électrique. (Voy. t. IV, p. 64 du *N. Cimento*.) Avec un élément de Bunsen à faible résistance additionnelle, la différence entre le travail à l'extérieur et à l'intérieur de la pile est proportionnellement plus grande que dans une pile présentant une résistance interférente plus considérable. La différence ne peut être attribuée aux pertes, car celles-ci ayant été mesurées avec grand soin, se trouvaient être de beaucoup inférieures à la différence constatée. Despretz a reconnu que dans toutes les piles, même dans celle de Daniell, le travail extérieur n'était jamais égal au travail intérieur.

[2] La polarisation des rhéophores dans les circonstances pratiques, se réduit à un dépôt qui se fait sur les lames polaires. Ce dépôt, gazeux ou solide selon les circonstances produit une contre-action qui entrave le courant. En dehors de cette signification déduite de l'observation, toutes les autres acceptions dans lesquelles on a emloyé le mot polarisation sont vides de sens.

qui nous intéresse extrêmement. Au contact des substances, l'équilibre de leur constitution est troublé (le potentiel a varié). Le rétablissement de l'équilibre ne peut se faire sans un travail intérieur, travail de nature très-complexe.

Nécessité de l'arc conducteur.

L'ensemble des faits réunis par les physiciens modernes nous autorise à conclure qu'il existe dans la pile une cause de mouvement intérieur continu, mais la même action ne permet pas le rétablissement complet de l'équilibre par les liquides de la pile, et il est nécessaire de faire intervenir une substance conductrice qui établisse la communication avec les plaques métalliques, de cette façon l'action chimique peut se continuer. En un mot, on ne peut supprimer l'arc conducteur qui est un véritable régulateur de l'énergie chimique en permettant le passage d'une quantité définie d'électricité d'un élément voltaïque à l'autre.

Explication de cette nécessité.

Pour expliquer ces faits, trois hypothèses seulement sont possibles : 1° l'action chimique détermine vraisemblablement un mouvement moléculaire, c'est-à-dire une vibration dans les corps placés en contact réciproque par l'effet de laquelle, lorsque par exemple la réaction s'opère entre le zinc et l'eau acidulée, de l'hydrogène est mis en liberté ; et c'est ce même mouvement vibratoire qui se propage dans le conducteur interpolaire ; 2° on peut supposer qu'une partie de la matière pesante des corps mis en contact se constitue à un état de ténuité extrême, s'élance dans le conducteur de décharge et forme ainsi ce que l'on appelle le courant ; 3° étant admis que les divers corps de la nature contiennent en certaine proportion un agent impondérable nécessaire à leur constitution, on est autorisé à penser que son état d'équilibre est troublé par l'action chimique survenue lors du contact de deux substances hétérogènes. Une certaine masse de cet impondérable est mise en branle, et la totalité ou une fraction seulement de l'éther en mouvement se reconstitue en équilibre par l'intermédiaire des rhéophores, véritables canaux de communication.

Réfutation de la première.

La première hypothèse est contraire aux faits exposés dans l'article précédent, à moins de regarder le mouvement vibratoire de la matière comme nécessairement accompagné d'un transport de la matière elle-même, mais alors on retombe dans la seconde ou la troisième supposition.

D'après la deuxième supposition, le courant serait exclusivement constitué par la matière pondérable portée à un haut degré d'atténuation. Il serait difficile de démontrer rigoureusement en quoi cette manière de voir est fausse, car nous savons combien est grande d'une part la tendance de la matière à se répandre dans l'espace, et d'un autre côté combien les corps sont poreux même ceux en apparence très-compactes; ainsi, le fer et le platine sont perméables aux gaz à un degré tel que ces fluides les traversent malgré la pression atmosphérique[1]. Pourquoi ne se comporteraient-ils pas de même en présence de la matière arrivée aux dernières limites de la raréfaction? Il se pourrait donc à la rigueur que la force répulsive qui anime les molécules durant une réaction chimique fût assez énergique pour déterminer un véritable flux de la matière à travers la matière elle-même, ce en quoi consisterait le courant. Mais pour comprendre les choses de cette façon, il faut imaginer la matière parvenue à un état d'atténuation tel que très-vraisemblablement elle ne doit plus présenter les caractères de celle qui affecte nos sens. En effet, lorsqu'on examine les fils ayant servi pendant longtemps à transmettre le courant électrique, on observe les signes d'une violente agitation intérieure, leur structure moléculaire est profondément modifiée, de gros fils de cuivre recuits, et très-flexibles, après le passage d'un fort courant se trouvent très-écrouis et très-rigides, mais jamais il n'a été possible de constater une augmentation de poids Dans les cas où deux conducteurs hétérogènes avaient été réunis bout à bout, on n'a jamais rencontré dans l'un la moindre parcelle de la substance de l'autre; cependant cela devrait arriver si le courant était un transport de matière pesante à travers le fil conjonctif. Fusinieri a montré, il est vrai, que sous l'influence de puissantes décharges une substance pouvait mécaniquement traverser une plaque métallique, mais dans ces expériences on opérait avec de fortes tensions et sur de faibles épaisseurs; en outre, on a émis des doutes sur la réalité du phénomène de transport. Admettons néanmoins que les objections ne soient point fondées; ne voyons-nous pas que les conditions de ces expériences sont trop différentes de celles du courant de la pile pour que leurs résultats puissent servir de

De la deuxième.

[1] Deville et Troost, *Mondes* et *Comptes rendus*, 17 décembre 1863.

base à notre discussion? Je ne sais si les idées exprimées plus haut sur les qualités de la matière parvenue à son état de plus grande division sont acceptées par les défenseurs de la matérialité du courant; toujours est-il que dans les diverses expériences de transport, la matière conserve sa nature pondérable et chimique, on s'en est assuré expérimentalement; il y a donc là une difficulté infranchissable. Mais nous pouvons encore ajouter davantage.

Autre objection.

Expliquer ainsi la genèse du courant, c'est reculer la difficulté et non la résoudre, car il restera toujours à dire pourquoi, en plongeant dans un acide un métal attaquable, il peut se produire à la fois une agitation, une expansion et une raréfaction de la matière aussi intenses que celles dont nous admettons l'existence à l'intérieur d'une pile? Peut-être essayera-t-on de répondre en imaginant une grande inégalité entre les états répulsifs des éléments moléculaires. On dira que ces éléments étant mis en présence, l'équilibre tend à s'établir, d'où résulte un bouleversement considérable dans l'intérieur des substances. Mais alors la violence de cette collision intime doit être immense, car les éléments matériels sont lancés à travers les fils les plus minces avec une puissance telle qu'ils les traversent d'un bout à l'autre, malgré la grande longueur et la faible section de ces conducteurs; et cependant quelquefois les fils conducteurs, véritables canaux d'écoulement du courant électrique, se déploient sur une étendue de plusieurs milliers de kilomètres. Il ne faut pas se le dissimuler, en creusant cette hypothèse on ne trouve que difficultés et obscurités. Nous sommes éloignés de condamner comme absurdes les idées que nous critiquons actuellement, toutefois, à notre sens, il n'y aurait aucun mal à essayer de remplacer ces suppositions vagues et incomplètes par des notions qui fussent mieux en rapport avec nos connaissances touchant les actions moléculaires.

Adoption de la troisième hypothèse.

La troisième hypothèse nous paraît remplir ces conditions; du reste, elle diffère peu de la seconde dans ses éléments essentiels. En effet, rien d'impossible à croire que les molécules pondérables résultent de combinaisons déterminées des atomes élémentaires de cette même matière nommé éther. Ces assemblages constituent des centres ou noyaux indépendants qui se trouvent plongés dans les milieux libre environnant. Alors dans certains cas de

rapprochement mutuel ces centres ou noyaux ou comme on les appelle molécules pourraient bien être grandement modifiés, dilatés, dissous même, et le résultat de ces modifications produirait le flux d'éther nommé courant.

De cette façon, pour comprendre la propagation du courant électrique, il nous suffit d'appliquer les principes précédemment exposés lors de l'étude de la chaleur et de la lumière. Les phénomènes lumineux nous ont appris que dans tous les corps, y compris les métaux, l'éther existe à divers états de densité, et que, autour de chacune des molécules matérielles, on peut supposer une atmosphère ou tourbillon d'éther raréfié. Si ces molécules arrivent au contact alors qu'elles sont libres d'obéir à tous les mouvements, comme cela se présente dans les liquides et les gaz, nécessairement les atmosphères éthérées se pénétreront, se fusionneront, tout se passera de molécule à molécule et l'effet sera une agitation intérieure de la masse. Nous avons déjà dit plus haut que dans ces cas : 1° lorsque des molécules inégales se réunissent, il se fait un dégagement de chaleur, en d'autres termes, une portion de la force vive des atomes devient libre et se manifeste sous forme de chaleur ; 2° l'atmosphère du système résultant peut être formée par une quantité d'éther différente de la somme de celles appartenant aux molécules composantes. Dans ce cas évidemment une portion de l'éther devra se transporter de particule à particule jusqu'à ce que la quantité excédante se soit dissipée, ou bien jusqu'à ce qu'au contraire la quantité manquante soit compensée. Un tel équilibre pourra bien s'établir de molécule à molécule dans un gaz, mais jamais dans un solide : dans ceux-ci il faut un flux qui se transporte d'une région de la masse à l'autre, il y aura donc un courant. En effet l'observation prouve que le courant, ne se développe qu'en présence de quelque corps solide, ou au moins liquide. Les métaux mis en communication avec les corps qui peuvent se combiner avec eux pourront, suivant leur nature, soit déterminer, soit tout au moins favoriser les perturbations dans l'équilibre des tourbillons éthérés, perturbations qui sont l'origine du mouvement électrique. Ils produiront cet effet parce que le contact une fois établi, l'éther qui les pénètre naturellement, qui est nécessaire à leur consti-

tution, pourra être déséquilibré, et évidemment cette rupture d'équilibre, ce transport d'éther, s'effectuera dans une direction déterminée, celle dans laquelle l'éther possédant la plus grande densité, peut se décharger sur les parties où elle est moindre. Dès lors la fonction spéciale des conducteurs métalliques s'ajoutant à l'action dissolvante du liquide actif sur le métal, il en résulte un augment de la réaction chimique. Sans cette influence adjuvante, les effets de l'action chimique resteraient limités à la première couche de liquide, et dans les autres couches les atmosphères moléculaires ne seraient pas suffisamment ébranlées. On s'explique ainsi l'office du circuit conducteur, car après la réunion du zinc au cuivre à l'aide d'un fil métallique, les excès d'éther dont les molécules du couple sont chargées peuvent se disséminer dans l'arc de jonction et y circuler jusqu'à ce que l'équilibre intérieur soit rétabli.

Nature du mouvement circulatoire

Le mouvement circulatoire dure aussi longtemps que restent en présence les corps réagissant chimiquement l'un sur l'autre : aussi le dit-on continu ; mais évidemment il procède par une série de très-petites oscillations, par un transport successif de section à section, et le mouvement est saccadé, au moins dans les premiers instants comme nous l'apprennent les décharges voltaïques tirées même des piles les plus intenses. Enfin, il est aisé de comprendre comment une résistance quelconque introduite dans le conducteur d'une pile en un seul point diminue dans tout le circuit la quantité d'électricité en circulation en se rappelant cette propriété bien connue des fluides en mouvement : la masse qui traverse toutes les sections d'un canal demeure constamment la même ; donc, lorsqu'une quelconque de ces sections présente la moindre résistance, le cours du fluide est modifié tout entier.

Conséquence importante.

Si telle est l'origine du courant, il s'ensuit que les diverses dispositions électromotrices ne permettent pas avec une égale facilité de recueillir la totalité de l'électricité produite, en d'autres termes de recueillir et de conduire dans le circuit rhéophore, l'éther qui passe d'une molécule à l'autre durant l'accomplissement des réactions chimiques à l'intérieur de la pile. On doit rejeter toute disposition voltaïque dans laquelle la réaction entre le métal et le liquide a une intensité assez grande pour rétablir

directement l'équilibre entre les molécules mises en contact. Au contraire, on adoptera celles dans lesquelles la même réaction n'ayant pas une énergie suffisante pour continuer d'elle-même une fois commencée, il faut favoriser son développement en faisant intervenir une substance auxiliaire. Aussi le zinc très-pur ou simplement amalgamé est le métal qu'il convient d'employer à la construction des piles ; le potassium, au contraire, serait d'un très-mauvais usage, car à lui seul, en dehors de toute action auxiliaire, il décompose l'eau, s'unit à l'oxygène et met l'hydrogène en liberté. Tant il est vrai que si à l'origine de tout courant électrique on trouve une action chimique, la réciproque n'est pas vraie et une action chimique ne sera pas toujours capable de développer un courant électrique extérieur, proportionnel à sa propre intensité. L'effet dynamique d'électricité se traduira au dehors du couple électromoteur dans les seuls cas où l'éther des atmosphères moléculaires sera forcé de s'échapper dans l'arc de décharge. Remarquons encore que les rhéophores ne seront pas traversés par toute la chaleur dégagée pendant la combinaison chimique ; ils en recevront une partie seulement qui leur sera communiquée par le flux qui les traverse.

On comprend maintenant pourquoi les corps réagissant chimiquement l'un sur l'autre avec une très-grande violence, ne sont pas ceux dont l'emploi est le mieux indiqué pour obtenir un courant, car ils ne produisent pas l'électricité extramoléculaire avec une intensité proportionnelle à l'énergie de leur combinaison chimique et de la rapidité avec laquelle ils disparaissent dans leurs dissolvants.

Réflexions sur les combinaisons voltaïques.

Les liquides de nature différente, susceptibles d'agir chimiquement les uns sur les autres, peuvent également favoriser le développement du courant et sa détermination dans une direction définie, en combinant leur action à celle des métaux. La même observation s'applique à plusieurs autres phénomènes secondaires qui se produisent entre les divers éléments mis en présence dans une pile ; et c'est l'ensemble de toutes ces circonstances qui, au point de vue pratique, rend telle disposition voltaïque plus avantageuse que telle autre. Ainsi, lorqu'on veut apprécier la valeur d'une pile, il ne suffit pas d'estimer l'intensité de l'action chi-

mique intérieure. Les expérimentateurs ont étudié de préférence certaines combinaisons électromotrices dans lesquelles l'action extérieure se trouve être précisément égale au travail intérieur ; toutefois, même dans ces conditions spéciales, on observe souvent, avons-nous dit, des différences, et l'équivalence ne se vérifie pas constamment. Habituellement on attribue ces irrégularités aux actions locales, et souvent une telle interprétation est exacte; mais dans un grand nombre de cas, cette explication ne suffit pas. Les sources de ces différences sont nombreuses. Ainsi, par exemple, on ne peut espérer d'arriver à une compensation exacte des actions qui se passent dans les rhéophores et dans la pile, avec des combinaisons voltaïques qui produisent un dégagement de gaz. Ce dégagement absorbe déjà une force vive qui ne peut se trouver dans l'arc conjonctif. Ainsi, pour citer un autre exemple, il faut tenir grand compte du degré de pureté du zinc. On se demandera peut-être si les mêmes effets seraient obtenus en employant le zinc pur et en remplaçant l'eau aiguisée d'acide sulfurique par l'acide nitrique ; on serait peut-être porté à croire que de cette manière le courant devrait acquérir une plus grande intensité, car l'action chimique est plus violente, et une question semblable pourrait être faite à l'égard d'autres métaux chimiquement purs. Mais l'expérience ne confirme pas cette prévision, et à cela rien d'étonnant, car le cas présent est en tout point comparable à celui précédemment examiné lorsque nous supposions le zinc d'une pile remplacé par du potassium.

Solution d'une objection.

Au dire de quelques savants, les réactions chimiques reconnaissent pour cause initiale la tendance à l'expansion des substances mises en présence. Ils disent que la matière de ces corps se trouvant considérablement atténuée sur toute la surface en contact, la combinaison s'effectue et un nouveau corps prend naissance, et qu'ainsi cette atténuation peut produire le courant. Mais dans cette manière de voir, il est nécessaire d'imaginer d'abord une force atténuatrice de la matière, afin de rendre compte des phénomènes chimiques, et secondement il faut recourir à une nouvelle hypothèse pour expliquer comment agit l'arc interpolaire pour déterminer le trouble moléculaire et obli-

ger la matière atténuée à se renfermer dans cette espèce de canal; si bien que l'on appelle à son aide ces forces arbitraires dont on prétend débarraser la physique. De plus, d'un autre côté, en regardant le courant comme un flux matériel, on est obligé de concevoir la matière portée à un tel degré de ténuité qu'elle a perdu tous les caractères de celle qui constitue les corps pesants; en un mot, on admet une matière qui ne diffère réellement que par le nom de celle appelée par nous éther.

Donc, le moyen le plus simple de comprendre les phénomènes consiste à regarder le courant comme naissant du choc des molécules hétérogènes de la matière pondérable, lequel produit un trouble intense dans les atmosphères éthérées enveloppant les mêmes molécules, et ce dernier donne lieu à un transport d'éther qui est un des éléments principaux du flux électrique. Conclusion.

De cette façon on concilie en quelque sorte la théorie chimique et la théorie du contact, c'est-à-dire les deux opinions qui pendant longtemps ont divisé les physiciens sur l'origine de l'électricité dynamique. Assurément le contact ne peut pas, en tant que contact, engendrer le courant, pas plus que, si l'on veut obtenir un écoulement d'eau dans un tuyau, il ne suffit pas d'adapter un tube à un récipient, il faut encore que le vase soit rempli de liquide. Et cependant l'application du tube est une condition *sine quâ non* du phénomène. Il est bon de remarquer du reste que telle était réellement l'opinion des premiers électriciens qui soutinrent les théories du contact. Suivant eux, toutes les substances renfermaient une certaine dose d'électricité naturelle, et à l'instant où elles étaient extrêmement rapprochées, mieux encore, contiguës, l'équilibre électrique était rompu, puis un nouvel état d'équilibre s'établissait qui avait pour résultat immédiat le développement du courant, et si le flot d'électricité ne pouvait s'écouler il se constituait à l'état de tension. On comprend ainsi parfaitement l'impulsion initiale, mais comment expliquer le travail continu de la pile? Les défenseurs de la théorie du contact ne pouvaient donc expliquer de la sorte que l'état initial de la pile. Dans ces années dernières on s'est demandé si c'était le contact des métaux entre eux, ou plutôt celui des liquides ou des gaz avec les métaux (Helmholtz). Cette question dans le cas de la pile Influence du contact dans l'état initial.

est insoluble car les combinaisons sont trop complexes. Des expériences à l'abri de toute objection semblent démontrer que certains corps, spécialement des métaux, sont susceptibles de présenter une tension électrique initiale dans des conditions où il est impossible de constater une réaction chimique. Marianini, le premier, plus tard Gassiot, ont prouvé que l'équilibre naturel des substances peut être troublé lorsqu'elles sont rapprochées à une fort petite distance[1]. Plusieurs savants n'acceptent pas les conclusions de ces auteurs et rapportent les résultats de leurs expériences soit à une oxydation exercée par l'air qui, selon eux, quoique parfaitement sec, agit sur tous les métaux, même les moins altérables, tels que l'or, le platine, etc., soit à quelque autre cause du même genre. Néanmoins, ces causes n'ayant jamais été constatées et étant restées jusqu'à présent inaccessibles à nos procédés d'expérimentation, on a le droit de se refuser à en admettre l'existence.

Théorie chimique.

D'un autre côté, il est une question que l'on peut toujours adresser à la théorie chimique : *Quelle est en dernière analyse la cause initiale de l'action chimique ?* Ne peut-on pas dire que la constitution moléculaire ou éthérée des corps étant différente pour chacun d'eux, lorsqu'ils sont placés à une très-petite distance ou en contact immédiat, une perturbation intérieure se manifeste et donne naissance au courant? Et alors n'est-ce point là un véritable effet de contact? Nous arrivons ainsi à conclure que les deux théories, interprétées logiquement, ne sont nullement contradictoires ; par conséquent, la discussion des faits innombrables fournis pour ou contre chacune d'elles devient inutile. A ceux qui se contentent d'affirmer que l'action chimique dépend de la constitution moléculaire, nous demanderons quelle idée ils se font de cette condition. Si on nous répond en invoquant la *polarité*, nous insisterons pour savoir en quoi consiste cette polarité, car le terme servant habituellement à désigner l'action de forces émanées de centres fixes, on doit reconnaître que de semblables forces ne permettent pas d'expliquer les phénomènes du courant. De

(Marginal note beside "et donne naissance": Leur conciliation.)

[1] Voy., pour Marianini, ses mémoires, et, pour Gassiot, *les Mondes*, 17 décembre 1865, p. 577.

plus, nous revenons ainsi à l'idée des forces, pures abstractions, utiles tout au plus comme termes de convention destinés à représenter les faits avec concision.

Plusieurs physiciens éminents, excellents expérimentateurs, font jouer un grand rôle à cette force de polarité. Mais, lorsqu'ils essayent de faire comprendre la signification réelle et pratique de cette expression, ils n'en donnent aucune idée nette ; tout au plus arrivent-ils à dire qu'ils désignent ainsi une rupture d'équilibre dans l'électricité naturelle, suivant une modalité déterminée. Cette hypothèse est assurément très-ingénieuse, mais elle n'est pas mieux prouvée que toutes celles présentées sur le même sujet[1]. Force de polarité.

Nous devons avouer que l'on rencontre de nombreuses difficultés à traiter théoriquement les conditions pratiques des divers genres de piles, et cependant elles se réduisent toutes à des cas particuliers de ce phénomène multiforme nommé l'action chimique dont nous pouvons comprendre le mécanisme général, grâce au principe formulé plus haut ; mais pour donner la raison des faits considérés un à un, il faudrait à l'occasion de chacun d'eux savoir exactement les conditions des phénomènes, comment les molécules sont disposées, quel est l'état d'équilibre de leurs atmosphères, etc. ; toutes choses dont la détermination a été jusqu'à ce jour impossible et qui, peut-être, dépassent les limites de l'intelligence humaine. Difficulté réelle du sujet.

Nous ne voulons pas nous égarer dans ce labyrinthe, et nous nous en tenons aux considérations développées dans le livre I. Les réactions chimiques, avons-nous dit, sont parfaitement comparables entre elles et aux autres affections de la matière : elles sont réductibles à de simples actions mécaniques et l'étude du courant jette une grande lumière sur les phénomènes dits d'affinité. Le développement du courant est assurément un travail qui au fond ne diffère nullement de celui qui constitue l'action chimique ;

[1] On ne doit pas confondre polarité avec polarisation. Celle-ci est maintenant bien connue : elle consiste dans une réaction produite par les éléments décomposés par le courant et précipités sur les electrodes. Ainsi dans la pile primitive de Volta l'action s'affaiblit promptement par polarisation. Cela tient à ce que le cuivre se trouve bien vite couvert de zinc qui, dissout dans le liquide d'abord, se précipite ensuite sur le cuivre.

seulement dans le premier s'accomplit simultanément un transport du principe éthéré d'un point à un autre sur une étendue mensurable, tandis que, dans l'action chimique proprement dite, tout se réduit à un trouble local des atmosphères moléculaires avec échange d'éther d'une molécule à l'autre sur des espaces infiniment petits.

Résumé

Nous résumerons ce chapitre en quelques conclusions générales : 1° l'action chimique est réellement la cause du courant en circulation dans une pile ; mais, dans les diverses dispositions électromotrices, à de rares exceptions près, le mouvement électrique évalué sur le fil conjonctif n'est pas précisément égal à la somme du travail chimique accompli dans les divers éléments de la pile.

2° Quant à la genèse du courant, sans nier complétement la théorie qui fait du courant un transport de matière, cependant après un examen scrupuleux des faits, il nous paraît plus exact de le regarder comme un mouvement de l'éther qui imprégnant tous les corps, est nécessaire à leur constitution. Selon nous, l'équilibre éthéré des éléments d'un couple voltaïque subit un trouble profond par le fait de la réaction chimique s'établissant entre ces éléments, et un certain nombre d'atomes éthérés détachés des tourbillons moléculaires s'échappent à travers l'arc interpolaire. De cette façon se trouve établie la corrélation des phénomènes chimiques et électriques.

3° De ces phénomènes résulte comme corollaire une connexion entre les phénomènes chimiques et la structure moléculaire des corps en parfaite harmonie avec celle qui nous est révélée par la lumière ; car nous concevons comment certaines substances sont incapables de propager un mouvement transversal puisque leur éther intérieur est sujet à des déplacements faciles, comme dans les métaux, et de ces déplacements résulte une vibration dans le sens longitudinal qui se résout en un courant électrique.

Ce chapitre est un peu long, et sans doute la lecture en paraîtra pénible à certaines personnes ; mais les questions importantes et délicates ne doivent pas être traitées superficiellement, elles méritent qu'on s'impose quelque peine pour les comprendre.

CHAPITRE VI

RELATIONS ENTRE L'ACTION CHIMIQUE ET LA CHALEUR DANS LA PILE.

Nous avons reconnu que la source réelle du flux électrique circulant dans les rhéophores d'une pile est l'action chimique qui se passe à l'intérieur des cellules de cet appareil, et en vertu de laquelle un corps se substitue à un autre dans les liquides employés pour armer l'électromoteur. Or, dans toute réaction chimique, il se dégage une quantité définie de chaleur; par conséquent, l'origine de la chaleur intérieure d'une pile n'est pas douteuse. Il nous reste seulement à préciser les lois de sa distribution dans les couples et dans les électrodes, et à établir la comparaison entre les phénomènes spéciaux à chacune de ces deux localités voltaïques. Origine de la chaleur dans la pile.

Nous exposerons d'abord les résultats observés pendant les décompositions électrochimiques, puis nous mettrons en regard ceux relatifs aux actions calorifiques.

La loi fondamentale qui régit l'électrolyse des composés chimiques a été découverte par Faraday, dont elle porte le nom; elle s'énonce ainsi : Lorsque dans le circuit interpolaire d'une pile on introduit un nombre quelconque de voltamètres renfermant chacun une substance réductible par le courant, les poids des éléments séparés sont entre eux comme leurs équivalents chimiques. Loi électrolytique de Faraday.

Ainsi, pour 1 gramme d'hydrogène mis en liberté, on trouvera 31,5 de cuivre, 104 de plomb, etc. Donc l'action voltaïque est parfaitement définie et soumise aux lois de l'affinité chimique. A cause des nombreuses actions secondaires qui accompagnent les décompositions électrolytiques des groupes moléculaires un peu compliqués, il est parfois difficile de vérifier l'exactitude de la loi énoncée ci-dessus au moins pour les éléments transportés au pôle positif. Mais Becquerel a montré qu'elle se confirmait constamment quant à l'élément électropositif, par suite il doit en être de même à l'égard des éléments électronégatifs. Donc nous poserons cette règle générale que, « dans l'action électrolytique d'un cou-

rant, un élément se dépose en quantité proportionnelle à son équivalent chimique. »

La présente loi a pour homologue celle qui a été observée touchant les actions calorifiques. Une quantité donnée de chaleur élève à une température égale des poids de substances chimiquement équivalents[1]. Si bien que les équivalents chimiques, thermiques et électrolytiques, multipliés par un rapport constant, se convertissent les uns dans les autres et par conséquent en travail mécanique.

La détermination rigoureuse de la valeur numérique de ces équivalents est extrêmement difficile. Quelques expériences ayant été faites par nous dans cette direction, nous en citerons les résultats simplement pour fixer les idées. Une pile de Bunsen de 30 éléments capables de donner une belle lumière électrique, décompose $0^{gr},106$ d'eau par seconde, et élève de 1° dans le même temps la température de 38 grammes d'eau, c'est-à-dire produit 0,038 de calorie, quantité équivalant à 16,12 kilogrammètres[2].

Loi de la chaleur développée.

En employant une pile montée avec du zinc pur et de l'acide sulfurique, on constate la loi suivante : La quantité de chaleur dégagée par le seul fait de la combinaison chimique est égale à celle que l'on trouve développée dans le circuit électrique; mais, dans le calcul de cette dernière quantité, il faut tenir compte et de la chaleur renfermée dans la pile et de celle propre au circuit interpolaire, de telle sorte que l'égalité : chaleur totale de combinaison = chaleur dans la pile + chaleur dans l'arc conducteur, est toujours satisfaite.

Travail mécanique dans le circuit.

Si une machine électromagnétique est intercalée dans le circuit d'une pile et produit un certain travail mécanique, la quantité de chaleur de l'arc conducteur diminue; or, connaissant l'équivalent mécanique de la chaleur (voy. liv. I, chap. III), il est facile de convertir le travail obtenu en chaleur; et les calories ainsi obtenues

[1] Voy. plus haut livre I.

[2] Ces nombres montrent clairement combien sera coûteux le travail mécanique exécuté par une machine électromotrice correspondant à un certain poids de zinc dissous dans la pile; dans le cas présent, on a un cinquième à peine de cheval-vapeur; mais les valeurs que nous donnons sont de simples approximations. Dans ces recherches la décomposition de l'eau est loin d'épuiser la force électrique du courant. Une très-grande partie se perd comme chaleur échauffant le liquide (surtout si les rhéophores sont petits), et l'action électrolytique n'est qu'une fraction de toute l'action réelle.

seront précisément égales au déficit calorifique observé dans le rhéophore. Tous ces faits ont été mis en pleine évidence dans une série d'expériences très-rigoureuses, entreprises par Favre.

Cependant Soret a démontré que la chaleur transformée en travail mécanique n'était pas exclusivement empruntée à l'arc extérieur, et que l'intérieur de la pile contribuait aussi à cette dépense. Cela ne contrarie nullement le principe général, mais seulement affecte la distribution dans le système[1]. La loi dont nous parlons est une remarquable conséquence du principe de la conservation des forces vives, car s'il existait dans le circuit une quantité de chaleur qui ne fût pas produite par l'action chimique, cette quantité aurait été créée de rien, et si réciproquement la quantité totale de chaleur intérieure et extérieure se trouvait être moindre que celle engendrée par l'action chimique, il y aurait annihilation du mouvement, ce qui est impossible[2].

Une décomposition chimique est un travail exécuté par le courant, elle peut donc se substituer directement à la chaleur qui se développe dans le circuit. On a un bel exemple de cette transformation dans l'expérience suivante souvent répétée par nous. Faisant usage d'une forte pile grand modèle de Bunsen, ayant au moins 30 éléments, telle que celle servant habituellement à produire la lumière électrique, on prend pour conducteurs deux fils de platine un peu fins et on les plonge peu à peu dans un vase rempli d'eau. Au commencement il n'y a aucune décomposition chimique ; mais, au contraire, on observe de petites décharges lumineuses, et la surface des fils est revêtue d'une sorte de voile ou de gaîne lumineuse qui donne au fil le même aspect que s'il était incandescent, quoiqu'il ne le soit pas. Les fils font entendre un léger sifflement dû très-probablement au dégagement de la vapeur; enfin l'eau s'échauffe rapidement et, en quelques instants, arrive à l'ébullition, sous l'influence de cette même chaleur qui, sans l'eau Travail calorique.

[1] Soret, *Corrélation de l'électricité*. Genève, 1858.

[2] Clausius donne la relation suivante comme expression de la quantité de chaleur H en fonction de l'intensité I d'un courant électrique :

$$H = A.l.I^2,$$

A étant l'équivalent de la chaleur pour l'unité de travail, *l* étant l'intensité du courant exprimée en unités mécaniques. (Voy. B. U., *Archives sc. nat.*, 1857, t. XXXVI, p. 121.)

dans laquelle plongent les rhéophores, se serait manifestée sous la forme d'une brillante gerbe de lumière. Mais si l'on enfonce les électrodes dans l'eau, lorsqu'ils atteignent une certaine profondeur, immédiatement l'action chimique commence, la température du liquide diminue et tout retombe dans le cas d'une électrolysation ordinaire avec légère élévation de température. Dans cette belle expérience, il y a évidemment substitution d'une action chimique à une action calorifique. Le dégagement de chaleur observé dans la première phase du phénomène nous paraît devoir s'expliquer ainsi : l'action calorifique du courant étant condensée sur une faible surface échauffe fortement le fil de platine ; cependant le fil ne peut atteindre l'incandescence, car il y a soustraction incessante de chaleur de la part du liquide qui l'environne, mais il atteint une température supérieure à celle de l'ébullition de l'eau, par suite celle-ci passe à l'état sphéroïdal autour de la surface des électrodes et dès lors ne les mouille en aucun point. Le contact immédiat de l'eau et de l'électrode n'existant pas, la décomposition chimique n'a point lieu. Mais si le fil conducteur pénètre de plus en plus dans la masse fluide, la surface en rapport avec l'eau augmente de même, et à partir d'une certaine longueur immergée la déperdition de chaleur est telle que le fil ne peut conserver une température suffisamment élevée pour maintenir l'eau à l'état sphéroïdal ; alors le contact s'établissant entre l'eau et le platine, la décomposition chimique commence [1]. On obtient des effets analogues avec les courants extrêmement courts des batteries de Leyde. En faisant passer la décharge dans un fil métallique, on les volatilise sur une longueur assez considérable ; mais en dirigeant la décharge à travers l'eau, tout se réduit à une décomposition peu marquée.

Substitution du travail chimique au thermique.

Égalité des trois travaux.

Il est donc évident que tout travail chimique déterminé qui s'accomplit entre les pôles d'une pile peut être remplacé en totalité ou en partie par un travail soit thermique, soit mécanique. Thomson dit, avec une grande justesse, que supposant trois piles égales

[1] Voy. notre mémoire sur la lumière électrique, p. 74, *Nuovo Cimento*, vol. IV. Cette expérience, que nous croyions nouvelle, avait déjà été faite par Quet et ensuite par Despretz avec une pile de 100 éléments de Bunsen ; aussi ce dernier a-t-il pu obtenir sur les liquides des phénomènes extraordinaires de dilatation.

dont l'une décompose un liquide, la seconde échauffe un fil et la dernière exécute un travail mécanique, ces piles étant par hypothèse exemptes de toute résistance passive intérieure, on obtient pour un même poids de zinc dissous une quantité constante de travail, laquelle transformée en action mécanique ordinaire représente l'équivalent mécanique de la chaleur. Mais nous avons vu dans le premier livre quelle énorme quantité de chaleur devient latente par le fait de la dissociation élémentaire qu'exige la moindre décomposition chimique ; aussi, dans l'exemple cité, l'effet chimique doit paraître sur une échelle bien petite par rapport aux deux autres, et il en est réellement ainsi.

Questions sur l'électrolyse.

Actuellement plusieurs questions importantes se présentent à nous. Demandons-nous premièrement : A quel genre d'action physique se réduisent les décompositions chimiques? Pourquoi, si l'on veut obtenir un même effet avec une certaine pile, un seul couple suffira ; avec d'autres, au contraire, il faudra disposer plusieurs éléments en batterie? Évidemment cette inégalité d'action dépend du rapport qui existe entre le travail actif et le travail passif dans chacune des piles employées. Le travail actif, c'est la combinaison du métal ; les travaux passifs sont la décomposition de l'eau et celle des acides employés. Un seul couple suffira ou non pour électrolyser une substance donnée suivant que le travail du premier genre surpassera ceux du second ou leur restera inférieur. Voici, du reste, un exemple pratique.

Calcul du travail thermo-chimique

Nous avons parlé plus haut des résultats obtenus par Favre. Une fois en possession de ces données expérimentales, il raisonne de la sorte : pour décomposer un équivalent d'eau, le travail chimique du couple (ou plutôt la fraction de cette action qui passe dans les rhéophores) doit nécessairement fournir à l'électrolyte une quantité de chaleur égale à celle qui se dégage pendant la formation d'un équivalent d'eau, soit 34462 calories (nombre de Favre)[1]. Or, dans le couple de Grove, il y a d'abord la formation du sulfate de zinc qui donne 53258 calories par chaque équivalent de zinc dissous, nombre dont il faut retrancher la chaleur enlevée par le dégagement de l'oxygène de l'acide azotique réduit. Si cet

[1] Daguin, *Tr. de physique*, t. III, p. 591, 2e édition.

acide devient AzO^2 ou AzO^3, la quantité à soustraire est 6887 ou 13634 ; de sorte que dans le cas le plus défavorable, le nombre des calories fourni par le couple est encore de 39624, quantité plus grande que 34462, et par conséquent le travail de décomposition pourra avoir lieu. Au contraire, dans le couple de Wollaston de la chaleur de sulfatation du zinc 53258, il faut retrancher celle qui est absorbée par le dégagement de l'hydrogène, ou 34462 : dans le couple de Daniell celle qui est absorbée par la réduction du cuivre soit 29605 ; de sorte qu'il reste, pour le premier, seulement 18796 calories et pour le second 23453, quantités de chaleur inférieures à celles qu'exige la décomposition de l'eau[1], et par conséquent la décomposition sera impossible avec un simple élément. Cet exemple nous montre à lui seul combien il importe d'évaluer la somme de travail actif et passif de la pile et nous conduit à croire que l'électrolyse de l'eau est un effet de cette dissociation produite par la chaleur dont nous avons parlé (liv. I, chap. XI). Nous écartons bien entendu le cas où les électrodes, fils de platine polarisés, par exemple, sont capables de décomposer l'eau en vertu d'une action propre.

Pourquoi la pile décompose à basse température.

Dans les circonstances actuelles, nous voyons une action chimique d'une notable intensité se produire à une basse température; cette particularité tient à l'absorption continue de chaleur que nécessite la mise en liberté des éléments gazeux. On doit aussi tenir compte de la rapidité avec laquelle les éléments isolés sont séparés, circonstance favorable, car elle empêche leur recombinaison ainsi que le prouvent les expériences de M. Deville sur la dissociation, et celles de M. Silvestri qui a observé la recombinaison lente des gaz dégagés par voie électrolytique lorsqu'on les laisse mélangés les uns avec les autres en présence de l'eau[2].

Rapport de la chaleur et des forces électromotrices.

Un travail assez étendu de Marié-Davy et Troost, continué plus tard par M. Marié-Davy, a prouvé que les *forces électromotrices* mesurées suivant la méthode de Ohm sont *proportionnelles aux quantités de chaleur dégagées par les actions chimiques qui se passent entre les éléments des couples :* aussi peut-on légitimement employer les forces électro-motrices pour mesurer les quantités de

[1] *Annales chim. et phys.*, 3e série, t. III, p. 423.
[2] *Nuovo Cimento*, t. XXVII, p. 305.

travail moléculaire et les quantités de chaleur qui en résultent.

En outre, de nombreuses expériences permirent à ce physicien de conclure que *les quantités spécifiques de chaleur, dégagées dans ces combinaisons sont dans le même ordre et dans les proportions assignées par les chimistes aux affinités de ces substances pour l'oxygène*[1].

Ainsi les forces électromotrices étant proportionnelles aux quantités de chaleur et celles-ci aux affinités chimiques, les forces électromotrices sont proportionnelles aux affinités, et par suite les affinités chimiques sont proportionnelles aux quantités de force vive ou de chaleur produites par la combinaison d'un équivalent des diverses substances. **Forces électromotrices propres aux actions chimiques.**

Toutes ces lois cadrent parfaitement avec celles exposées précédemment sur les actions calorifiques (liv. I). Elles avaient été déjà entrevues par les physiciens du commencement de ce siècle, qui reconnurent que les forces électromotrices sont proportionnelles aux affinités chimiques ; et ces observations donnèrent naissance aux théories électrochimiques de Berzelius et aux échelles d'électrotisme de Marianini. A ce propos, il est bon de faire observer que le seul moyen que nous ayons d'évaluer numériquement les affinités chimiques consiste à estimer soit la quantité de chaleur dégagée pendant la combinaison, soit l'intensité du courant qui prend naissance dans ces mêmes conditions.

Nous résumerons brièvement les lois dynamo-électriques de la pile en quelques propositions. Le pouvoir électromoteur d'une pile est proportionnel : 1° à la somme algébrique des travaux moléculaires intérieurs (travaux positifs et négatifs) ; 2° à la somme des travaux résistants accomplis chemin faisant par le courant à l'intérieur de l'appareil voltaïque et dans le circuit extérieur ; 3° à la quantité de chaleur développée dans le circuit, en supposant nulles les résistances extérieures au circuit, et en prenant pour puissance motrice la somme des actions chimiques accidentelles et normales ; 4° aux quantités de chaleur engendrées par les travaux moléculaires des combinaisons effectuées. **Résumé des lois du travail dynamo-électrique.**

Ces lois ne diffèrent pas, quand au fond, de celles posées pré- **Lois de Joule.**

[1] Voy. les mémoires de Marié-Davy, cités plus haut, intitulés : *Recherches théoriques et expérimentales sur l'électricité*. Paris, 1861.

cédemment par Joule. Il établit que : 1° le courant est proportionnel au nombre des atomes d'eau ou de zinc consommés pour lui donner naissance ; 2° la chaleur dégagée par un couple voltaïque est en raison directe de la force électromotrice et du nombre des atomes décomposés ; 3° la chaleur totale du circuit est proportionnelle au produit du nombre des atomes décomposés dans chacun des couples, multiplié par la somme des forces électromotrices[1].

Soit donc une pile simple et exempte de toute action locale, on peut donner de la genèse du courant la théorie suivante : Par la substitution du zinc à l'hydrogène une quantité finie de force vive évaluable en calories devient disponible, c'est la puissance motrice. Ce mouvement se transmet au circuit sous forme de mouvement électrique ; que l'on considère celui-ci comme un flux de matière pondérable ou d'éther ; lorsque ce flux rencontre des résistances, il met en branle les atomes du milieu résistant, et la force vive électrique devient chaleur ; autrement dit, une partie du mouvement électrique de translation se convertit en vibration calorifique de l'éther et de la matière pesante. Quand la force vive du courant n'est en aucun point dépensée à obtenir un travail extérieur, l'équivalence est complète entre les quantités de chaleur produites par l'action chimique et celles que renferment les cellules de la pile et les rhéophores du circuit : dans le cas d'un travail extérieur mécanique, radiant, électrolytique, etc., il y aura entre ces deux quantités une différence équivalente au travail.

Décomposition électrolytique réduite à la dissociation.

La connexion intime que nous avons reconnue entre les diverses conditions de la pile et la quantité de chaleur dégagée par l'action chimique nous apprend que l'explication des décompositions électrochimiques devient très-simple quand on les compare aux phénomènes de dissociation produits par la chaleur seule ; à cette différence près, que l'action calorifique étant alors concentrée sur une très-petite surface acquiert par cela même une plus grande énergie. Cette concentration est due à l'intervention de l'arc conducteur. Plus on diminue les surfaces et plus les décompositions sont faciles, si bien qu'une pile étant donnée, ses effets électroly-

[1] Joule, *Arch. d'élect.*, 1852, t. II, p. 54.

tiques sont maximum quand les rhéophores sont des fils minces, pourvu cependant qu'ils ne s'échauffent trop pour empêcher le contact. Wollaston est même parvenu à obtenir des effets de décomposition chimique à l'aide de la machine électrique ordinaire en concentrant toute son action sur la section extrême des conducteurs; pour cela il scellait l'électrode dans un tube de verre, de telle sorte que le fil communiquât avec le liquide seulement par la pointe. Si l'action calorifique est trop intense, par exemple lorsqu'on emploie une très-forte pile avec des rhéophores ayant un petit diamètre (voy. p. 330), la température dilatant le liquide d'une façon excessive, celui-ci passe à l'état sphéroïdal autour des fils conducteurs, une forte radiation s'établit dans la masse qui est traversée en même temps par une série de petites décharges instantanées, et la décomposition n'a pas lieu.

Ces observations nous donnent une idée assez simple du mécanisme de l'analyse de l'eau par la pile, et en même temps elle confirme l'existence d'une relation intime entre la chaleur et l'électricité. L'action mécanique du courant lorsqu'elle est concentrée dans le fil rhéophore fait osciller les atomes en leur communiquant des vibrations excessives, à tel point qu'ils ne peuvent rester unis étant lancés hors de leurs sphères d'action réciproque. De plus, le courant leur communique une quantité de force assez grande pour les maintenir à l'état de molécules isolées, et ainsi ils abandonnent la combinaison. Cependant on ne peut trop diminuer ces surfaces, car alors la tension thermique devenant excessive, produit en tout ou en partie l'état sphéroïdal dont nous avons parlé ci-dessus: ainsi il nous est arrivé d'avoir avec 50 grand élément de Bunsen, et de petits rhéophores une décomposition moindre de celle que nous obtenions avec un petit nombre de couples. Si le courant a une petite quantité, cette concentration des rhéophores est utile. Explication des phénomènes.

Les atomes, lors de leur mise en liberté, étant dans un état électrique positif ou négatif, sont entraînés au pôle de nom opposé à celui de leur signe, mais à cause de la mauvaise conductibilité du milieu, ce transport est le résultat d'un échange d'atomes s'effectuant couche par couche. Donc, sans réclamer l'aide d'aucun principe nouveau, tout le mécanisme voltaïque se réduit à un jeu spécial de la force vive calorifique mise en disponibilité pendant Transport des éléments.

les réactions chimiques; cette action, transportée d'une section à l'autre des conducteurs interpolaires par le torrent électrique, anime les masses sensibles et l'éther de mouvements vibratoires qui se traduisent au dehors par des élévations de température, des radiations lumineuses, des décompositions chimiques. Ainsi se trouve justifiée cette heureuse expression de Faraday, déjà citée, *que le courant est une action chimique en circulation.*

Analyse de la circulation électrique.

Mais il ne sera pas mauvais d'insister un peu sur ce sujet pour nous faire une idée du passage du courant pendant l'électrolyse.

1° Nous avons vu que dans les substances isolantes dont les extrémités sont électrisées en sens contraire, il se produit un déplacement d'électricité, soit par induction (comme dans les lames de mica), soit par polarisation, comme cela se passerait suivant quelques-uns dans les masses continues (Cantoni). Cette polarisation ne fait que déplacer l'éther dans chacune des molécules sans lui faire parcourir un espace fini. Il faut une tension énorme pour pouvoir arriver à surmonter la cohésion moléculaire, et obtenir un passage violent avec rupture des corps, ainsi que cela a lieu quand on perce le verre.

2° Dans les corps conducteurs, l'électricité se propage par le mouvement moléculaire propre du corps: ainsi, dans l'aimant, elle revêt le type circulatoire dont nous parlerons, à tel point que le courant paraît supprimé dans toute la portion occupée par la partie magnétique libre, d'où il résulte que l'électricité ne circule pas en laissant en repos l'éther préexistant, mais le courant se propage par le moyen de l'éther constituant le corps lui-même. Toutefois ce mouvement dans les corps conducteurs ne se fait pas par un simple mouvement vibratoire (comme la chaleur), chose que nous avons déjà vue être impossible, ni par cette sorte de mouvement éthéré dans lequel les atomes sont déplacés momentanément de leur position, puis ramenés à cette position par les forces sollicitantes; ce que l'on appelle osciller entre les limites de l'élasticité; mais ce mouvement se fait de telle sorte que la partie déplacée reste au moins partiellement à la nouvelle position occupée sans revenir définitivement sur ses pas.

Comparaison empruntée à la mécanique.

Pour nous servir d'une comparaison empruntée à la mécanique usuelle, le mouvement oscillatoire de la première espèce serait

comparable à celui d'une série de billes d'ivoire soutenues chacune par un fil et se touchant mutellement ; série dans laquelle le mouvement de la première bille se transmet à la dernière sans translation des billes intermédiaires, mais seulement par l'oscillation et le changement de forme de chacune des billes en particulier. Le second mouvement serait analogue à celui qui survient dans une série de billes de billard posées sur la table, et séparées l'une de l'autre par un petit intervalle. La première mise en mouvement choque la seconde et demeure à la place qu'elle avait quand elle a rencontré celle-ci ; la deuxième choque la troisième, mais après change de place, et sans revenir après le choc à la position qu'elle occupait tout d'abord. De sorte que, quand le mouvement est arrivé à la dernière bille, toutes les billes intermédiaires sont changées de place et si le même effet se reproduit d'une façon continue, on finira par obtenir une véritable course de billes. Les réunions d'atomes éthérés qui environnent les molécules pesantes dans les corps conducteurs, paraissent devoir être plutôt comparées à ce dernier système de billes qu'au premier. En effet, outre l'élasticité, entrent en jeu d'autres forces et d'autres résistances ; de la sorte, il arrivera qu'une partie de l'éther se trouvera déplacée et aura un véritable mouvement d'écoulement. La même masse éthérée qui environne les molécules se trouvera déplacée et mise en mouvement en totalité ou en partie, et un flux s'établira sur la ligne parcourue par l'électricité.

Dans le cas des corps décomposables, à peine le circuit est-il fermé que la tension électroscopique s'établit aux deux extrémités : positive à l'une, négative à l'autre. Cette tension n'étant qu'une véritable exagération de la vibration moléculaire éthérée pour la tension positive, ou un état déficient dans le cas de la tension négative, la couche de liquide contigue aux rhéophores se trouvera déséquilibrée; les molécules du composé seront poussées à se séparer pour rentrer dans un nouvel équilibre, et concevront une tendance à se séparer au pôle même, par exemple positif. Sans l'influence de cette tension électrique, à peine sortis du contact du rhéophore, les molécules se recombineraient, de même que la vapeur d'eau dissociée dans un tube de platine; ce qui reproduirait une nouvelle combinaison. Mais, en vertu de la tension, il arrivera

Séparation des molécules élémentaires.

que dans la première couche contiguë au rhéophore, autour duquel la substance est décomposée, la portion d'éther constitutif qui s'y trouve, se partagera en deux parties; l'une neutralisera la tension du pôle, suivant le signe qui lui est propre, l'autre réagira sur la molécule voisine, et échangera avec elle l'élément constitutif, ainsi qu'il a été dit que cela arrivait dans les corps polarisés. Cet échange aura lieu sur toute la ligne jusqu'à l'autre extrémité où la tension moléculaire se trouvera en contact avec le pôle de signe contraire au sien dans la pile, et se neutralisera, laissant ainsi libre l'autre élément pondérable. D'où il arrivera que tout élément se manifestera au pôle de la pile de nom contraire à l'état qu'il prend naturellement lorsqu'il est libre et hors de combinaison.

La figure suivante (28) peut montrer de quelle manière s'effectue l'échange intérieur dans le corps au moment de sa décomposition.

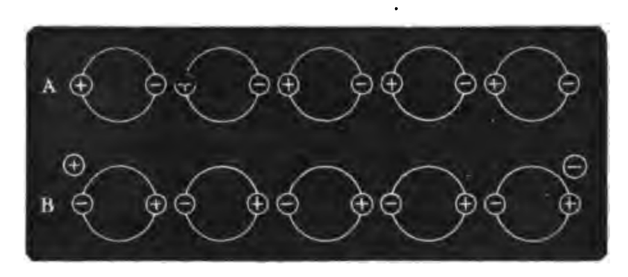


Fig. 28.

Supposons le corps composé représenté par le symbole M (fig. 29), pour chacune de ses molécules : la rangée A (fig. 28) représentera l'état naturel : par l'action électrolytique, la constitution du corps devient celle figurée par la rangée B, dans laquelle aux extrémités reste libre un des deux éléments.



Fig. 29.

Lois d'électrolyse.

On voit qu'à l'aide de cette théorie, nous expliquerons les faits suivants :

1° Les éléments dissociés ne doivent apparaître qu'aux pôles extrêmes sur les rhéophores.

2° La quantité du courant éthéré obtenu sera proportionnelle à la somme des équivalents dissociés, (c'est-à-dire en raison de la

proportionnalité établie entre les actions électrolytique et magnétique) l'action chimique sera proportionnelle à la déviation de la boussole.

3° De même que les équivalents chimiques possèdent une chaleur spécifique égale, de même ils devront exiger une quantité identique d'électricité pour être dissociés ; ce second travail dépendant de la force vive qui se trouve dans l'équivalent, laquelle est toujours la chaleur spécifique.

4° Si le corps n'est pas décomposable, mais cependant conducteur, c'est-à-dire tel qu'il permette ce déplacement moléculaire qui constitue le courant, le travail effectué dans le trajet sera proportionnel au carré de la vitesse du courant, c'est-à-dire au carré de ce qui constitue l'intensité du courant. Car ceci est un travail qui doit être proportionnel au carré de la vitesse.

Par là on a la solution d'une difficulté qui se présente à quiconque compare les effets chimiques et calorifiques de la pile. Si le premier travail est identique au second, on devra avoir l'action chimique proportionnelle au carré de l'intensité, tandis qu'en réalité, ces deux quantités sont simplement proportionnelles. Mais après ce que nous venons de dire cette proportionnalité est une conséquence naturelle de la théorie du travail, et prouve l'exactitude du principe duquel on est parti. Solution des difficultés.

En résumé, nous avons dans la nature deux classes de phénomènes : quelques-uns peuvent s'expliquer par la seule action de l'éther libre ; tels sont les phénomènes optiques, et ils s'effectuent dans les limites de l'élasticité. Les autres se passent dans l'éther constitutif des molécules corporelles, en en modifiant la structure au delà de la limite d'élasticité : ce sont les phénomènes électriques. Sous l'influence de l'action simplement inductrice dans les corps isolants, les atmosphères se modifient, mais ne se bouleversent pas ; dans les liquides décomposables, non-seulement elles se modifient, mais entre elles s'opèrent des échanges qui ont pour but de mettre en liberté des éléments isolés.

En voulant tout réduire à un mouvement vibratoire, ou à un mouvement de la matière pesante, tous ces faits sont incompréhensibles, et si on arrive à mettre en équation leur intensité, leur intelligence n'en devient pas par là plus claire. Au contraire,

en admettant l'éther, tout devient d'une facile compréhension, et si l'hypothèse est fausse, elle a au moins l'avantage de rendre intelligible la nature, ce qui est une forte raison de croire que l'hypothèse n'est pas erronée.

Nous verrons que toute la série des phénomènes du courant deviendra très-facile à entendre, grâce à l'hypothèse de l'éther qui par là sera d'autant confirmée.

Pour l'instant nous insisterons encore sur quelques-uns des points indiqués ci dessus afin de mieux élucider certains faits indiqués trop sommairement.

Développements ultérieurs.

Nous avons dit que les phénomènes de la pile sont un cas particulier de l'action chimique, phénomène beaucoup plus général, de telle sorte que l'on peut chercher dans l'action chimique l'explication du courant ; mais la réciproque n'est pas vraie, et une action chimique ne se réduit pas simplement à une manifestion électrique. Il importe de bien se pénétrer de cette distinction, sinon on trouverait des objections là où elles n'existent pas ; par exemple, il ne faudrait pas croire que dans toutes les piles électro-chimiques les lois précédemment indiquées se vérifient complétement.

Exceptions apparentes.

Ces lois sont tout au plus applicables aux couples formés par le zinc amalgamé et l'acide sulfurique, c'est-à-dire à ceux qui ont servi aux expériences desquelles les lois ont été déduites; avec d'autres dispositions, elles sont en défaut. Ainsi, d'après Raoult, en employant le zinc et l'acétate de zinc avec le plomb et l'acétate de plomb, la quantité de chaleur due à l'action chimique égale 15691 calories et la chaleur totale d'une pile montée avec ces éléments est représentée seulement par 12438 : en employant le cuivre et le nitrate de cuivre concurremment avec l'argent et le nitrate d'argent, la première valeur est 16402 tandis que la seconde est 7789[1].

Autre exception.

Dans ces circonstances les phénomènes se compliquent de réactions secondaires. Disons toutefois que même en considérant les cas les plus simples on trouve des irrégularités non moins évidentes. Ainsi il semble que, par l'introduction de fortes résistances

[1] *Cosmos*, 16 octobre, p. 430.

dans le circuit, on puisse régler l'action chimique de façon à ce que la durée du courant d'une pile soit en raison inverse de son intensité. Nos expériences n'ont point confirmé ces prévisions ; en effet, une pile de Bunsen bien isolée, avec un conducteur gros et court, nous donna 527 pour le produit de la durée par l'intensité ; la même pile reçut un fil long et fin, et la valeur du produit descendit à 260. La différence observée ne put être attribuée aux déperditions, car celles-ci (calculées en comparant la pile d'expérience à une autre placée dans les mêmes conditions d'isolation) furent trouvées de beaucoup inférieures à la différence constatée pendant l'expérience[1]. Par conséquent, dans les piles, même dans les meilleures conditions, si la résistance du circuit vient à augmenter, une grande partie de l'électricité en mouvement se décharge par une voie autre que le fil conducteur. Probablement le courant se décharge en revenant sur lui-même par l'intermédiaire du liquide intérieur, d'où résulte pour ce dernier une élévation de température.

Cas particulier de l'arc électrique.

En étudiant avec un galvanomètre le courant d'une pile animant une lampe électrique, on voit la déviation de l'aiguille aimantée rester constante depuis l'instant où on ferme le circuit jusqu'à l'extinction de la lumière, mais pendant ce temps la longueur de l'espace lumineux présente de grandes variations, c'est-à-dire la quantité de molécules mises en vibration ne demeure pas la même. Ce fait mérite d'être rapproché du suivant, observé par Faraday, touchant les décompositions électrochimiques. Lorsqu'on augmente le nombre des éléments d'une pile communiquant avec un voltamètre, l'électrolyse ne subit aucune variation, si en même temps un fil de platine, traversé par le courant, est porté à l'incandescence sur une longueur d'autant plus grande que le nombre des couples devient plus considérable. La nouvelle résistance, ajoutée par l'échauffement du fil, compense l'augmentation de la force produite par ces nouveaux éléments. Ces faits confirment que la tension est pour un courant ce qu'est la pression ordinaire qui pousse un fluide en mouvement. En effet, dans les expériences précédentes, nous pouvons comparer la pile de Bunsen à un moteur

[1] Voy. Mémoire sur la lumière électrique, *Nuovo Cimento*, t. IV.

hydraulique dans lequel on règle graduellement les résistances à mesure que change le niveau de l'eau employée à entretenir le mouvement, de telle sorte que la masse et la vitesse du liquide, au sortir du coursier, peuvent rester constantes. Cette pression, avons-nous déjà dit, suppose un mouvement oscillatoire, et les faits cités en ce moment appuient notre théorie, puisque la masse ébranlée effectivement dans le mouvement actuel est proportionnelle à l'intensité de la vibration dans le mouvement dit virtuel.

Le courant n'est pas inconciliable avec le mouvement vibratoire.

Nous ne croyons pas qu'on puisse trouver inconciliable ce mouvement vibratoire produit par le courant avec la fixité ordinaire des molécules dans l'intérieur du corps due aux attractions moléculaires. Ainsi nous pouvons comparer ce mouvement à celui qu'un courant d'air produit dans un champ de blé, alors qu'il détermine une oscillation des tiges en forme d'onde, bien qu'il soit un mouvement progressif. Cela arrive régulièrement jusqu'à ce que le vent se modère ; si celui-ci augmente au delà d'une certaine intensité, il pourra arracher les tiges des blés ; dans notre cas, ce serait la fusion ou désorganisation du solide traversé par le courant qui représenterait cette phase violente.

Les expériences de Soret prouvent que tout travail dynamique exécuté dans le circuit interpolaire réagit sur le courant. Aussi a-t-on raison d'admettre que la loi de l'intensité est dépendante des travaux qui s'accomplissent dans le circuit lui-même. Ces travaux sont de divers genres, et comme durant un travail mécanique les actions chimiques diminuent en raison simple de la quantité d'électricité et l'action thermique en raison doublée de cette même quantité, il s'ensuit que la chaleur dégagée peut compenser une action chimique.

En somme la force vive reste constante.

L'électricité étant un mode de mouvement, comme la chaleur et la lumière, elle se modifie diversement selon la nature du travail produit. Mais que le courant produise du mouvement, de la lumière ou de la chaleur, la force vive ne pouvant ni se perdre ni se créer, la même quantité de travail sera mise en jeu dans toutes ces transformations ; celui qui essayerait de contrôler expérimentalement ces inductions théoriques rencontrerait des difficultés nombreuses, car il lui faudrait reconnaître les divers genres de

travail, et évaluer numériquement chacun d'eux d'après les principes de la mécanique. Nous rencontrerons des écarts encore plus considérables en étudiant les phénomènes d'induction, lesquels représentent un travail d'une nouvelle espèce[1]. Mais, quelle que soit la diversité des métamorphoses, le principe général de la conservation de la force vive reste vrai. Parvenus à ce point de notre étude, ne devient-il pas évident que l'électricité n'est qu'une forme de mouvement dont les rapports avec la chaleur et l'action chimique sont des plus étroits; que ce n'est point un principe distinct des autres agents naturels comme le croyaient les premiers expérimentateurs, et que même elle se réduit à une modalité secondaire des forces de la nature. Cette conclusion deviendra encore plus évidente par la suite.

Dans ce sujet règne encore sur plusieurs points une grande obscurité; il ne nous appartient pas de la faire disparaître, mais nous engagerons les observateurs à examiner ces problèmes, ils présentent un beau sujet de recherches, et leur solution fournira des données utiles sur la corrélation des divers mouvements.

Conductibilité des liquides.

Afin de rendre plus claires les vues exposées un peu plus haut sur le transport des éléments par le courant, il importe de faire la remarque suivante. Les physiciens discutent encore pour savoir si, oui ou non, les liquides peuvent conduire un courant sans éprouver une décomposition électrolytique. La question est fort délicate. Cependant considérant que les liquides appartiennent à la classe des corps diaphanes; considérant combien ils s'éloignent

[1] Les questions que nous traitons actuellement sont d'un grand intérêt; elles ont occupé des physiciens distingués. Soret et Clausius (*Archives des sciences naturelles*, t. XLVI, 1857, p. 120 et suivantes, et p. 170); Favre (*ibid.*, 1859, p. 359). Voy., dans la note de Clausius, comment il rattache le fait fondamental à la théorie de la chaleur. Au fond, tous ces auteurs admettent une augmentation de résistance, mais de *résistance dynamique*. (Voy. Leroux, *loc. cit.*, p. 160.) Ceux qui aiment voir le principe de la conservation de la force vive appliqué à l'électricité, pourront consulter l'intéressant mémoire de M. Helmholtz, *Sur la conservation de la force*, page 100 et suivantes de la traduction française. Comme l'établissement de ces formules n'est d'aucune utilité pour éclairer la question de principe rationnel qui forme le but de cet ouvrage, nous ne croyons pas devoir ici développer ces raisonnements. Nous nous bornerons à indiquer le principe général qui sert de base à ces formules, et qui consiste en ce que toutes les fois que dans un système de corps où règnent ces forces, fonction des distances, il s'accomplit un changement de positions, la quantité des forces vives doit rester constante. Ce principe, appliqué aux actions électriques, donne des formules pour évaluer leurs intensités, mais il est loin de nous éclairer sur la nature du phénomène physique qui s'accomplit au moment de ce changement des distances.

des métaux par leurs propriétés optiques, on est autorisé à croire que, de même que les métaux ne transmettent pas les mouvements transversaux, de leur côté les liquides sont dans les conditions semblables à l'égard des mouvements longitudinaux, et par conséquent ils ne conduisent pas l'électricité. Toutefois, en raison de leur mobilité physique, ils se laissent pénétrer par les vibrations longitudinales jusqu'à une petite profondeur, et cela suffit pour troubler leurs molécules, d'où il résulte une série de décompositions et de recombinaisons successives, par l'intermédiaire desquelles l'équilibre de tension du courant se trouve établi.

Constance de capacité électrique.

Aux premiers paragraphes de ce chapitre nous avons indiqué comment plusieurs substances étant précipitées voltaïquement, les poids des substances déposées dans un même temps sont proportionnels à leurs équivalents; nous pouvons conclure de là que tous les corps présentent la même capacité électrique; en d'autres termes, la même quantité de mouvement électrique est toujours nécessaire pour décomposer un équivalent d'une substance quelconque. Telle est la seule façon exacte de comprendre l'expression capacité électrique. Nous retrouvons là une loi parfaitement homologue de celle qui a été posée en traitant des effets calorifiques produits par les actions mécaniques. Jusqu'ici nous ignorons complétement si les quantités d'éther qui forment les atmosphères des atomes pondérables sont égales, quelle que soit la nature des particules matérielles ; cependant la chose n'est pas impossible, et dans ce cas les atmosphères pourraient différer entre elles par la densité et par la vitesse de rotation.

Voilà tout ce qu'il nous est permis de dire sur une matière aussi difficile, et sur laquelle nos connaissances sont très-insuffisantes malgré le nombre des expériences faites à ce sujet. Voyons maintenant si, en renversant le problème et en cherchant les lois de l'électricité mise en mouvement par la chaleur, il est possible de pénétrer plus avant dans cette question pleine de mystères.

CHAPITRE VII

PRINCIPE GÉNÉRAL DES ACTIONS ÉLECTRIQUES. DE L'ÉLECTRICITÉ DÉGAGÉE PAR LA CHALEUR : THÉORIE DÉFINITIVE DU COURANT.

Principe électrique général.

L'immense collection des phénomènes électriques peut facilement se réduire à un principe général, qui nous servira de clef pour les enchaîner et les expliquer. Ce principe nous est déjà suggéré par les faits précédents, et sera confirmé par les suivants. On peut le formuler ainsi : Le vide absolu n'existe nulle part, et tout changement dans les corps modifie la disposition du milieu qui remplit l'espace. Toute modification de l'espace exige un travail dont l'effet se manifeste d'une manière ou d'une autre (vibration, tension ou flux), selon la constitution et la relation des corps en présence, et toute modification arrivée d'une manière quelconque dans l'espace, produit une réaction qui doit se traduire en travail.

Réciprocité des phénomènes.

Ce principe est la base de la loi de réciprocité qui s'applique à tous les phénomènes naturels ; ainsi l'électricité engendre la chaleur, à son tour la chaleur engendre l'électricité. La chaleur (et elle agit alors de même qu'une réaction chimique) trouble l'équilibre moléculaire, par suite elle produit courant et tension électrique. De plus les conditions de ce phénomène le rendent éminemment apte à nous renseigner sur la nature du flux électrique.

Dans les machines électriques ordinaires, les mêmes actions mécaniques qui développent l'électricité peuvent devenir sources de chaleur. On a utilisé surtout le frottement directement ou indirectement. Dans les nouvelles machines électriques de Holtz et de Bertsch, il se fait une transformation de force mécanique en électricité. Par exemple, quand dans la machine de Bertsch (fig. 50) on fait tourner le plateau PP′ avant d'avoir électrisé l'armure E, on n'éprouve aucune résistance, mais elle devient très-sensible après cette électrisation, car alors le secteur électrisé agit par influence sur le plateau. Il se fait donc là une transformation de

ravail mécanique en électricité, et médiatement en une quantité équivalente de chaleur qui se manifeste par l'étincelle jaillissant entre les conducteurs. Réciproquement, avec l'électricité fournie par une machine ordinaire, on peut faire tourner le disque de la machine de Holtz; alors les tensions électriques disparaissent transformées en mouvement mécanique.

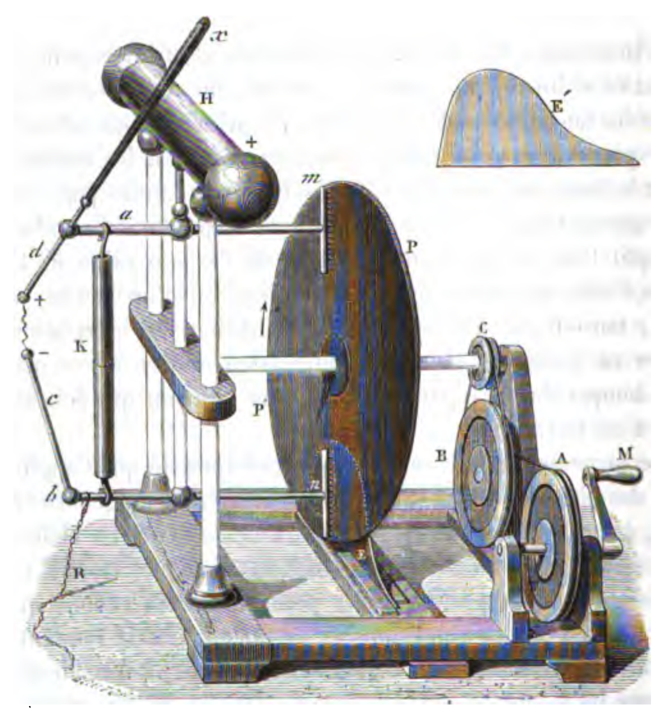


Fig. 59.

PP', Plateau en caoutchouc mis en mouvement par le système MABC. — E, Secteur en caoutchouc mobile qu'on électrise par friction. — *n*, Peigne communiquant au conducteur *vc* une tension négative. — *m*, Peigne communiquant au conducteur *ad* une tension positive. — K, condensateur servant à augmenter l'intensité de l'étincelle. — R, chaîne qui, mettant *bc* en communication avec le sol, augmente l'intensité des étincelles.

Calorique et électricité sont complémentaires.

Dans tous ces cas, l'effort mécanique qui met en vibration les molécules des corps dans la couche superficielle, trouble l'équilibre du milieu et par là l'équilibre des autres corps plongés dans le même milieu, d'autant plus facilement qu'elles sont moins forte-

ment soumises de la part des voisines aux pressions intérieures dont nous avons parlé plus haut. Dès lors, suivant la remarque fort judicieuse de Thompson[1], le travail exécuté par l'agent mécanique se manifeste partie sous forme de chaleur, partie sous forme d'électricité. Si le corps est mauvais conducteur du mouvement calorifique, l'effet reste concentré à la surface partie sous forme de chaleur, partie sous forme de tension électrique; au cas contraire, il se propage à l'intérieur de la substance et se traduit pour le moins comme simple chaleur et ordinairement comme courant électrique; mais, lorsqu'on désire mettre en évidence ces dernières manifestations, il faut user d'artifices particuliers; par exemple, veut-on obtenir des effets de tension, on frotte des corps bien isolés; s'agit-il de constater les effets dynamiques, on attache à l'un des bouts du fil d'un rhéomètre un morceau de métal que l'on peut frotter avec une lime reliée à l'autre extrémité.

La manière la plus simple de réunir ces deux classes de phénomènes en un seul faisceau est de les envisager sous le point de vue où nous nous sommes placé. Lorsque, par voie mécanique, on met en mouvement les particules d'un corps, il est impossible d'éviter que les molécules ne dépassent les limites de leurs vibrations naturelles, et alors l'agitation survenue dans la matière pesante se communique à l'éther intramoléculaire, lequel conçoit un mouvement vibratoire; si ce mouvement excède les limites de l'élasticité naturelle de l'éther, l'équilibre intérieur est rompu, et il s'établit un transport d'éther qui s'effectue progressivement à travers les couches successives des corps. Lorsque la substance est isolante et ne livre pas passage à l'éther, nous avons une rupture d'équilibre des couches superficielles, donnant lieu à des pressions et à des vibrations; lorsque le corps est au contraire bon conducteur de l'électricité, l'éther peut circuler librement dans ses couches profondes, et on a le courant électrique continu.

Courants thermo-électriques.

L'application à un corps de la chaleur fournie par une source étrangère suffit pour rompre l'équilibre de son éther intérieur; aussi la chaleur, indépendamment de toute action mécanique, est capable de développer des courants dont l'intensité varie

[1] Voy. Thompson, *Philos. Transact.*, 1856. On the dynamic qualities of metals. (Note de la page 650.)

avec les conditions de l'expérience. On fait à ce sujet dans les cours une expérience bien connue. On forme un circuit avec des métaux hétérogènes, par exemple (fig. 31), les deux extrémités d'un barreau de bismuth *op* sont soudées à celles d'une lame de cuivre *mn*, puis on fait agir une source calorifique au niveau d'une des soudures; aussitôt l'équilibre électrique est rompu et un courant prend naissance, comme il est facile de le voir par la déviation d'une aiguille aimantée. Les phénomènes acquièrent leur intensité maximum avec des assemblages de bismuth et d'antimoine, de

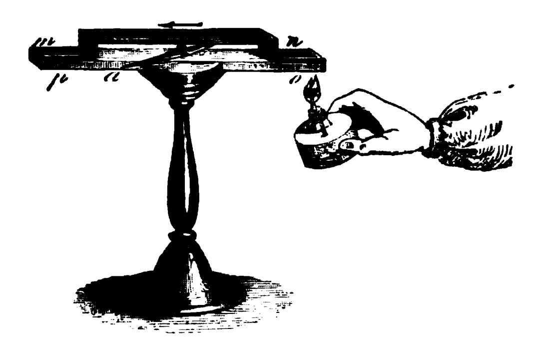


Fig. 31.

cuivre et de zinc, de fer et de platine, etc. Quand, au lieu de s'élever, la température des points de contact ou de soudure vient à baisser, il se produit encore un courant, mais en sens inverse du précédent. Dans ces expériences les métaux assemblés, avons-nous dit, doivent être hétérogènes. Ici le mot hétérogène est pris dans son acception la plus étendue, car même en réunissant des métaux de même nature, quand l'un d'eux a éprouvé quelques modifications physiques dans sa structure moléculaire, le courant peut se développer. Magnus a montré que, dans les cas où les deux métaux réunis diffèrent seulement par les dimensions de leurs sections, on n'obtenait aucun effet électrique ; donc, 1° le mouvement qui constitue ce courant se distingue de celui qui constitue la chaleur ; 2° si la conductibilité des diverses substances métalliques exerce quelque influence sur les phénomènes, elle n'en est pas la cause efficiente, puisque une augmentation de la section, qui rend la conductibi-

lité plus grande, n'est pas une condition suffisante pour le développement d'un courant thermo-électrique. Du reste, on arrive à la même conclusion en considérant que, dans le cas des métaux dissemblables, le courant ne marche pas toujours vers le meilleur conducteur ; il est donc nécessaire de rattacher la véritable cause du phénomène aux conditions de la structure même des corps.

La direction du flux varie avec la nature des métaux ; avec quelques-uns, le courant se dirige de la partie chaude à la partie froide (ex. l'antimoine); dans d'autres, il marche en sens inverse (ex. bismuth). De plus, le sens du mouvement électrique ne reste pas constant, même entre métaux semblables, si ces derniers présentent des différences de structure intérieure suivant la direction des plans de clivage, au cas où ils sont cristallisés, etc. Si l'on prend un barreau de bismuth obtenu par fusion dans un moule dont le trou de coulée correspondait au centre du barreau, lequel point est placé entre deux clivages opposés, les deux moitiés du métal donnent un courant de sens contraire, et au niveau de la masselotte, il y a un point neutre (Svamberg)[1]. Relation de ces courants avec les structures moléculaires.

Enfin l'intensité de l'action électrique dépend de la direction relative des plans de clivage propres aux deux métaux ; ainsi deux morceaux de bismuth, taillés suivant des faces plus ou moins inclinées sur les plans de clivage naturels, étant assemblés, le courant minimum se dévelope lorsque les plans de clivage sont parallèles entre eux, et le courant maximum lorsqu'ils se coupent à angle droit, de telle sorte que la ligne axiale de l'un corresponde à la ligne équatoriale de l'autre[2]. Suivant Matteuci, dans les barres à clivage axial, le courant marche de la région chaude à celle qui est froide, et *vice versâ* dans celles à clivage équatorial. Dans le fer, le magnétisme suffit pour déterminer le sens du cóurant.

Toutes les substances peuvent donner lieu à des manifestations électriques quand on leur a fait éprouver une modification moléculaire quelconque, soit en les comprimant, soit en les tordant ou en les étirant[3]. Dans les métaux maintenus à l'état de fusion, les Courants de torsion, de pression cubique.

[1] Svamberg, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Paris, t. XXXI.
[2] Franz et de la Rive, *Traité de l'électricité*, t. III, p. 493.
[3] Voy. le grand travail de Thompson dans *Phil. Transact.*, 1856, ou *Electrodynamic qualities of metals*, p. 718. Il établit que, dans le fer, le courant va du fer ordinaire au fer doux à travers la partie chaude.

courants thermo-électriques ne se développent pas (Matteuci).

D'après cela, les conditions qui déterminent la marche du courant dans un sens ou dans un autre, dépendent exclusivement de l'état physique du corps et de la distribution intérieure de ses molécules. Or cette distribution varie dans une même substance sous l'action de la chaleur. Nous avons dit précédemment que les axes des cristaux diaphanes peuvent changer de position; ainsi, dans quelques formes voisines du cube, à une certaine température, l'axe est la plus petite diagonale, et à une autre il est dirigé suivant la plus grande. Pour les substances métalliques la même chose a lieu certainement dans des limites beaucoup plus étendues, et cela nous permet d'expliquer le renversement de courant que l'on observe dans certains métaux : par exemple, le fer et le platine présentent un renversement de courant à la température de 380° (Becquerel).

Tension des courants thermo-électriques.

L'intensité et la tension des courants thermo-électriques est de beaucoup inférieure à celle des courants électro-chimiques : résultat facile à prévoir, vu la très-grande conductibilité des éléments. On a reconnu que 150 couples de cuivre et bismuth équivalent à peine à un seul couple Daniel. Ces courants ne sont donc pas capables de surmonter une résistance notable; aussi ne sortent-ils pas du système de corps au milieu duquel ils ont pris naissance; il se produit alors dans l'intérieur des métaux certaines pulsations électriques comparables aux mouvements de répercussion ou de remous que présentent les liquides renfermés dans des vases clos. Avec des galvanomètres ordinaires, il est impossible de reconnaître la présence de ces mouvements électriques. Nous verrons plus tard d'autres exemples de ces courants intérieurs : qu'il nous suffise de dire pour le moment que ces courants permettent d'expliquer les phénomènes répulsifs d'origine calorifique présentés par les cristaux de bismuth et de quelques autres corps sous l'influence du magnétisme. Cette question sera traitée dans tous ses détails en temps convenable.

La découverte des courants a permis de construire le thermo-multiplicateur (fig. 52), instrument qui permet d'évaluer les températures avec une délicatesse infiniment supérieure à celle de tous les thermoscopes antérieurement connus. A l'aide de

cet instrument très-sensible, il a été démontré que, dans toutes les substances, l'action d'une source calorifique quelconque *détermine non-seulement le mouvement thermique, mais encore un autre mode de mouvement qui, lorsque les conditions sont convenables, se traduit sous la forme de flux électrique extérieur, mais qui, dans tous les cas, s'établit dans l'intérieur de la substance elle-même*. Si le flux électrique prend telle direction et non toute autre, cela tient évidemment à ce que la structure intérieure du milieu n'est pas la même dans les divers sens. Cette structure intime dépend immédiatement de la condition de la matière nommée

Mouvement électrique produit par le thermique

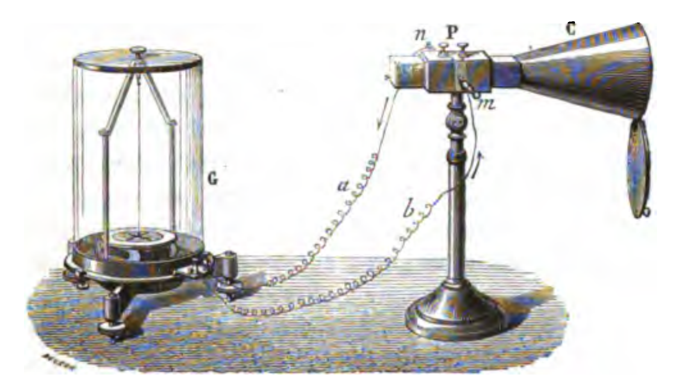


Fig. 52.

P, Pile thermo-électrique recevant les rayons d'un même faisceau calorifique par l'ouverture du cône C. — *m*, *n*, Bornes mettant la pile en communication avec les fils *a* et *b*. — G, Galvanomètre indiquant la présence du courant dans la pile et mesurant son intensité.

arrangement moléculaire, expression de pure convention, ne l'oublions pas, car jusqu'à présent nous ignorons complétement en quoi consiste le fait physique qu'elle représente.

Mouvement transversal transformé en longitudinal.

Une pile thermo-électrique, fonctionnant sous l'influence d'une radiation calorifique, nous donne l'exemple d'un mouvement vibratoire de l'éther qui, s'il traversait un corps diaphane, se propagerait par une suite d'ondes transversales, tandis que, dans le cas considéré, en se communiquant aux métaux de la pile, il s'est transformé au moins partiellement en courant longitudinal. Cette simple expérience nous montre de la manière la plus saisissante quelle part d'action revient à l'éther dans le développement du

courant électrique. En effet, supposons un mouvement quelconque communiqué à un corps : la matière pondérable, comme la matière impondérable intramoléculaire sont mises en branle du même coup, et le mouvement sera transmis soit par l'éther, soit par la matière pesante. Le mouvement de l'éther peut être double, ce milieu pouvant vibrer transversalement ou présenter un mouvement ondulatoire longitudinal, car il est capable de ces deux modes de mouvement ; mais l'opacité des métaux nous apprend que les vibrations transversales y sont impossibles; donc seules les ondes longitudinales pourront se développer. Si, au contraire, on dit que la force vive de la vibration incidente se communique tout entière à la matière pondérable, la conclusion précédente n'est pas invalidée, car l'éther recevra nécessairement une certaine quantité de la force vive qui anime les molécules de la matière grossière, ces dernières ne pouvant vibrer sans déterminer une certaine agitation du milieu qui les environne. De quelque façon que l'on se représente le mouvement oscillatoire de l'éther intérieur, on est forcé d'admettre un accroissement de l'amplitude des excursions moléculaires, et lorsque les vibrations exagérées des molécules dépassent les limites des forces élastiques[1], elles se trouvent dans le cas des ondes rompues, c'est-à-dire, donnent naissance à un véritable transport. Il se forme alors un flux dirigé dans tel ou tel sens, suivant la structure du conducteur au sein duquel naît le courant. Donc, ce que nous nommons courant électrique est un mouvement auquel participent la matière pesante et l'éther.

Notion définitive du courant.

Jusqu'ici nous ne nous sommes pas prononcé sur la nature du courant, et nous n'avons pas opté en faveur de telle ou telle des deux hypothèses rivales, dont l'une regarde le courant comme un flux de matière pondérable extrêmement atténuée, et dont l'autre fait du courant un simple mouvement de l'éther interposé entre les molécules de tous les corps. Mais l'examen des phénomènes thermo-électriques nous permet d'asseoir notre opinion. Dans ces expériences, nous voyons une simple vibration lumineuse engendrer un courant ; or il est difficile d'admettre qu'elle ait une puissance assez grande pour désagréger la matière pesante

[1] Les forces élastiques sont ici entendues comme nous l'avons expliqué, d'après Lamé, dans le deuxième livre de cet ouvrage.

et la lancer à travers un fil conducteur malgré les résistances de tout genre qui s'opposent au transport. Aussi, à notre avis, la manière la plus rationnelle d'expliquer les choses consiste à dire que : *Le courant électrique est un mouvement de la matière impondérable au sein de la matière pondérable, et dans un grand nombre de cas le flux de matière éthérée entraîne avec lui les molécules pesantes elles-mêmes.* Ce courant se produit toutes les fois que dans la vibration moléculaire la limite d'élasticité est dépassée, ce qui dans les métaux arrive plus facilement que dans les corps diaphanes.

On ne doit pas, du reste, être surpris que le même fluide puisse transmettre des mouvements divers avec lois et vitesses différentes ; cette propagation ne dépend pas de la nature du fluide, mais de la disposition des forces. Ainsi l'eau transmet le son avec une certaine vitesse, et les ondes mécaniques avec une autre : cela tient à ce que des forces différentes (l'élasticité et la gravité) sont en jeu dans les deux cas. Ainsi l'éther, dans les corps transparents, transmet la radiation avec une vitesse déterminée, et dans les métaux transmet l'électricité avec une autre ; dans ce second cas, ses mouvements sont reliés à la matière pesante et subissent des lois différentes.

Explication des transports mécaniques.

Dans un chapitre précédent, nous objections à ceux qui professent la matérialité du flux électrique que jamais on n'a surpris sur le trajet du courant des traces de pénétration de la matière, et que les rhéophores d'une pile, ni à leurs extrémités, ni dans leur partie moyenne, ne subissent de changement dans leur composition chimique, de sorte que si un transport de matière pondérable a lieu réellement, cela suppose à la matière une condition et des propriétés complétement différentes de celles propres à la matière pesante ordinaire : alors elle n'est autre que l'éther. Mais cette atténuation de la matière n'est pas démontrée par l'observation ; car l'expérience prouve que, dans ces phénomènes de transport, les substances conservent leur nature chimique. Il faut donc reconnaître que, dans les cas où la matière pondérable est détachée et transportée mécaniquement, ce transport se fait par un milieu différent de la matière pondérable. On peut encore expliquer sans difficultés comment une action dynamique aussi faible qu'une vibration lumineuse est capable de rompre l'équilibre

électrique, car nous n'avons plus à désagréger la matière pesante et à la chasser le long du circuit interpolaire, mais seulement à rompre l'équilibre de l'éther interposé aux molécules. En un mot, dans ce cas, le problème est le même que celui qui consiste à expliquer le développement d'un courant prenant naissance par une très-faible action mécanique, comme on le voit, lorsque retournant bout pour bout un morceau de fer doux devant un aimant, un courant assez énergique se développe aussitôt. Comment croire que des actions mécaniques aussi peu intenses suffisent à séparer les molécules matérielles les unes des autres et à les lancer au travers d'un conducteur? Toute complication disparaît en faisant du courant un mouvement de la matière impondérable, et appliquant le principe énoncé au commencement de ce chapitre, que toute action s'exécute dans le milieu qui remplit l'espace, et que le travail se développe d'une manière ou de l'autre, selon la condition de la matière qui est contenue dans le milieu. Ici la force vive ne pouvant se propager comme lumière, met en branle les molécules éthérées mêlées aux molécules pondérables, en produisant un flux de courant.

Mouvements de translation dans les vibrations

Du reste, même dans les mouvements vibratoires ordinaires, les transports de la masse ne sont pas insensibles en certaines circonstances. Les vibrations sonores s'accomplissent ordinairement de manière à ne pas dépasser les limites d'élasticité de l'air. Mais dans les violentes explosions, il se fait quelque chose qui ressemble à un véritable transport de la masse aérienne. On s'explique ainsi la propriété que possèdent la poudre et la nitro-glycérine de lancer les corps au loin avec une extrême puissance. Même dans le cas où le phénomène a une moindre intensité, lors de la détonation d'un pistolet par exemple à l'embouchure d'un long tuyau, Biot et M. Regnault ont constaté au début l'existence d'un véritable mouvement de translation, d'autant plus prononcé que l'explosion était plus violente.

On a reconnu également que la vitesse augmentait lorsque les sons étaient fort intenses, et lorsqu'on était voisin du centre d'ébranlement; qu'au contraire, elle présentait un ralentissement sensible dans les conditions inverses.

Enfin la propagation des mouvements au sein de l'eau nous

offre des exemples encore plus palpables. Tel est le brisement des vagues de la mer, où le mouvement d'oscillation donne naissance à des courants de transport assez énergiques.

Mais l'agitation communiquée à l'éther n'est pas la seule considération à faire valoir pour expliquer la genèse du courant, il en est encore une autre.

Diatabilité probable de l'éther.

Considérant l'extrême mobilité de l'éther au sein des bons conducteurs, il n'est pas impossible que cet impondérable soit dilatable à un certain degré. L'éther est, en définitive une matière, et ses atomes n'échappent pas aux lois générales du mouvement : aucune différence de nature ne le sépare de ceux de la matière sensible, mais seulement une différence d'agrégation ; probablement les premiers sont isolés et libres, tandis que les autres sont formés de plusieurs atomes simples. Supposons que l'agitation intérieure du milieu vienne à s'accroître, les atomes oscilleront suivant les courbes plus étendues, ils s'écarteront donc les uns des autres, d'où une véritable dilatation. Cette augmentation de volume donnera forcément naissance à un transport d'éther, en d'autres termes à un courant. Ainsi tout s'explique sans qu'il soit nécessaire de supposer l'éther compressible, il suffit de le regarder comme un fluide ayant toutes les propriétés naturelles à cet état. Il est bien entendu que cette mobilité de l'éther appartient exclusivement aux corps bons conducteurs, et ne se rencontre jamais dans les substances isolantes.

Développement de ce principe

L'hypothèse de la dilatabilité de l'éther n'est pas nouvelle ; elle s'est imposée d'elle-même pour ainsi dire aux observateurs. Il est facile de voir comment tous les moyens dont nous disposons pour transformer la force vive moléculaire et la faire travailler, se réduisent à deux : la dilatation de la matière (spécialement des gaz) et le courant électrique. Dans le premier cas, lorsqu'on se sert d'une vapeur ou d'un gaz, tout se ramène à établir à l'aide de la dilatation un courant matériel de fluide, qui, véritable véhicule de la force vive, l'absorbe en un point de son trajet pour la dépenser en un autre. Or l'électricité agit de même, elle transporte la force vive moléculaire d'une section du circuit à une autre. N'avons-nous pas vu, en effet, que toutes les lois de l'écoulement des fluides conviennent à la ligne d'action de la force électrique, et

que tous les phénomènes observés ne peuvent être expliqués en supposant une simple vibration longitudinale constituée par de petites oscillations analogues à celles du son.

Peut-être les partisans de la matière atténuée y verront un flux de matière pondérable et nous objecteront que si, dans un tube de Gassiot, un léger échauffement de la potasse vaporise une quantité de matière assez grande pour livrer passage au courant, de même, sous l'influence d'une faible élévation de température, les molécules d'un métal s'atténuent considérablement et feront irruption dans l'épaisseur du conducteur. Nous répondrons que la dissemblance entre ces deux ordres de phénomènes est palpable. Dans les tubes de Gassiot, l'élévation de température du verre a vaporisé un peu de potasse ou d'acide, et les vapeurs transmettent le courant, mais l'action calorifique n'a pas engendré le courant, et celui-ci a une autre origine. Deuxièmement, à l'intérieur de ces tubes la diffusion s'opère dans le vide; au contraire, dans les conditions que suppose l'hypothèse actuellement en discussion, il faut que les atomes matériels pénètrent les métaux et autres corps fort compactes qui, tout poreux qu'on les suppose, sont néanmoins des milieux résistants; et cependant ces conducteurs résistants seraient traversés par le courant avec la vitesse prodigieuse de plusieurs milliers de lieues par seconde, ce qui constitue une véritable impossibilité. Mais, dira-t-on, nous admettons que la chaleur détermine un déplacement des seules parties matérielles nommées atomes élémentaires. Nous répondons, alors l'objection ne porte plus, car ces parties ne sont autres que les atomes éthérés, et nous sommes d'accord. Donc, par voie d'exclusion, il reste prouvé, autant que faire se peut, que le courant est le flux de la matière éthérée renfermée dans tous les corps et nécessaire à leur constitution.

Les corps conducteurs sont opaques.

Nous trouvons un solide argument en faveur de nos idées dans le fait remarquable que les corps conducteurs du courant sont précisément ceux au milieu desquels s'éteignent les mouvements vibratoires transversaux (les cas de décomposition étant exceptés); si bien que les corps se partagent en deux classes: 1° les diaphanes, au sein desquels l'éther peut vibrer; 2° les métalliques, dont l'éther intérieur n'entre jamais directement en vibration lumineuse, de telle sorte que lorsque l'éther est mis en mouvement l'agitation

lui est communiquée par la matière pondérable dont l'excitation préalable paraît indispensable. Car, remarquons-le bien, l'existence de l'éther dans les métaux ne peut être mise en doute, puisqu'ils deviennent réellement transparents, lorsqu'ils sont amenés à l'état de feuilles très-minces; donc si dans leur condition ordinaire ils sont opaques, cela tient seulement à ce que le mouvement transversal des ondes lumineuses ne peut se propager; peut-être précisément à cause de l'extrême mobilité du milieu lui-même. En effet, nous avons vu que la structure des métaux permet aux molécules pesantes de se déplacer facilement, que la vitesse de la lumière y est plus grande que dans les diaphanes, et il est absurde de prétendre que l'éther intramoléculaire ne puisse jouir de cette même mobilité. Il n'est donc pas irrationnel d'admettre la possibilité d'un mouvement longitudinal de l'éther dans les corps conducteurs et son impossibilité dans les isolants; ces derniers laisseraient par contre passer exclusivement les vibrations transversales. Les deux genres de mouvements peuvent avoir une origine commune, mais leur mode de propagation est dissemblable, car vibrer n'est pas couler.

Considérés sous un autre point de vue, ces deux mouvements présentent encore des différences caractéristiques : le premier est réversible, et l'autre ne l'est pas. Les vibrations, sauf le cas de réflexion, ne reviennent jamais en arrière; un flux, au contraire, peut rétrograder, or nous citerons bientôt des exemples de véritables phénomènes de reflux dans le courant électrique. Le sens d'un courant est tantôt négatif, tantôt positif, et les effets observés varient avec le sens du mouvement : dans les mouvements vibratoires, il n'en est jamais ainsi.

Différence essentielle contre les deux mouvements.

Si la lumière consiste exclusivement en oscillations des atomes éthérés, sans aucune espèce de translation, ainsi que nous l'avons indiqué en parlant de la polarisation des rayons lumineux, les choses se comprennent encore mieux, et en admettant l'éther en équilibre, stable dans les corps diaphanes et instable dans les corps opaques, on commence à reconnaître pourquoi les uns permettent la transmission des vibrations, et les autres, celle des courants. Grâce à cette hypothèse, une liaison remarquable apparaît entre les propriétés optiques et les manifestations électriques

Relation des propriétés optiques et électriques.

des corps, et d'autre part nous entrevoyons une certaine relation entre ces mêmes propriétés optiques et celles d'ordre chimique. En effet, deux corps étant mis en contact, l'action chimique rompt l'équilibre de l'éther intérieur, d'où, comme premier effet, apparition d'une certaine tension électrique à la surface des corps, puis, comme effet ultérieur, développement d'un courant. La chaleur agit d'une façon analogue, mais alors l'équilibre de l'éther est troublé par un effet d'expansion. En résumé, mieux que toutes les autres suppositions proposées pour atteindre le même but, celle qui regarde le courant comme un flux de matière impondérable, nous permet d'expliquer un très-grand nombre de faits, en même temps qu'elle établit un lien entre les propriétés les plus opposées en apparence. L'éther n'est plus un fluide destiné exclusivement à engendrer la lumière par ses vibrations ; le cadre de l'hypothèse s'agrandit, et nous permet d'embrasser, dans une théorie simple et rationnelle, l'ensemble des phénomènes de la nature.

Envisagées de la sorte, les actions thermo-électriques sont relativement à l'éther des effets homologues de ceux produits par l'action de la chaleur sur une masse fluide renfermée dans un vase ayant ses diverses parties à des températures inégales. Supposons un assemblage de tubes cylindriques de forme rectangulaire ABCD de section constante renfermant un liquide chauffé en A et refroidi en C (fig. 33). Par effet de dilatation, des mouvements se développent au sein de la masse dans tous les sens, mais si nous imaginons en B et D une disposition mécanique quelconque, valvulaire ou autre, telle qu'au point B le mouvement soit seulement possible de A en C et au point D, de C vers A, évidemment un courant s'établira dans le sens ABCD et circulera aussi longtemps que durera l'application de la chaleur sans jamais changer de direction.

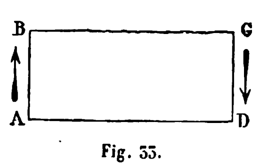


Fig. 33.

Les conditions toutes théoriques de cette expérience sont en réalité celles du thermosiphon et de plusieurs machines à vapeur dans lesquelles la même eau revient sans cesse dans la chaudière après s'être condensée dans un réfrigérant fermé.

Imaginons maintenant un cadre rectangulaire formé de métaux hétérogènes, chauffé en A et refroidi en B (fig. 34), nous reproduirons sous une autre forme le système précédent ; seulement ici ce n'est point un liquide qui entrera en mouvement, mais l'éther logé dans les intervalles des atomes métalliques. La chaleur trouble l'équilibre des atmosphères éthérées distribuées autour des molécules matérielles, un courant prend naissance et s'établit dans le sens de la moindre résistance.

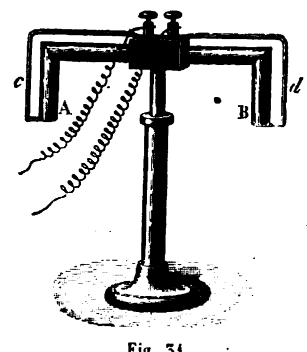


Fig. 34.

Dans l'appareil précédent, les soupapes déterminaient le sens du mouvement circulatoire, à l'intérieur des métaux la structure moléculaire remplira les mêmes fonctions en laissant les molécules plus mobiles dans tel sens que dans tel autre.

On se demandera certainement en quoi consiste cet arrangement moléculaire, et comment, au point de vue mécanique, on peut s'expliquer son influence sur les mouvements de l'éther.

Pour donner à nos idées une forme palpable, nous emprunterons aux enfants un de leurs jouets favoris ; l'exemple, pour être familier, n'en sera pas moins instructif. Chacun de nous connaît la récréation enfantine qui consiste à construire un petit moulin avec quelques plumes fixées sur le contour d'une rondelle de bois, mobile autour de son centre, ayant soin de donner à chacune des ailettes une inclinaison convenable. En un mot, on forme une véritable hélice dextrorsum ou sinistrorsum, suivant la direction que l'on donne aux bras du moulin. Cela posé, supposons un nombre pair d'hélices de ce genre distribuées uniformément le long d'un même axe ; mais que sur une moitié de la longueur de l'axe, les hélices soient dextrorsum, et sur l'autre sinistrorsum. En exposant cet appareil à un vent léger, toutes les hélices se mettront en rotation, seulement une moitié tournera dans un certain sens et l'autre en sens opposé. De telle sorte que si nous les supposons renfermées dans un tube au travers duquel nous

Comparaison empruntée à la mécanique.

pouvons faire passer un courant d'air, les ailettes opposeront une certaine résistance au mouvement de la masse gazeuse, et cette résistance sera la même, quelle que soit des deux ouvertures terminales du tube celle qui reçoit le courant. Mais supposons les hélices toutes de même nature, et de plus, imaginons qu'elles ne puissent tourner que dans une seule direction ou bien encore que, par un mécanisme particulier, elles soient animées d'un mouvement de rotation propre dans un sens déterminé. Évidemment la facilité avec laquelle nous pourrons lancer un courant d'air suivant l'axe de notre cylindre ne sera pas la même en introduisant le gaz par une extrémité ou par l'autre; la résistance sera maximum lorsque le mouvement du flux gazeux contrariera la rotation des hélices, et minimum dans le cas contraire.

La comparaison à laquelle nous avons eu recours est fondée sur un jeu d'enfant, mais elle n'est pas moins digne de considération, car la nature travaille toujours de même et suit constamment les mêmes lois dans les phénomènes les plus compliqués de notre existence et dans nos récréations les moins sérieuses.

Application.

Inutile de faire ressortir les analogies entre les faits que nous venons de signaler et ceux que nous nous proposons d'éclaircir; le lecteur nous a devancé. Dans les corps solides les molécules sont diversement conformées, et, à cause de cela, leurs moments d'inertie sont inégaux : elles sont encore en rotation et la facilité avec laquelle elles modifient ce mouvement dépend du sens dans lequel elles tournent. De plus, les molécules des corps cristallisés étant orientées dans une direction fixe, la résistance qu'elles présenteront à la propagation d'un flux envahissant le milieu solide, varie avec la direction du courant. Les corps sont-ils amorphes? La non-homogénéité de la masse, la condensation inégale des molécules dans les divers sens, expliquent suffisamment pourquoi, suivant une direction donnée, le courant est plus difficilement transmis que suivant toute autre. En outre, les molécules étant en rotation, leurs axes présentent nécessairement une orientation plus ou moins régulière.

Influence de la structure cristalline.

Lorsque nous avons étudié les corps diaphanes cristallisés, nous avons vu combien était grande l'influence sur leurs propriétés de tous les éléments ayant une relation quelconque avec

la structure cristalline ; il est donc naturel de croire qu'il en est de même pour les substances métalliques. Supposons que deux métaux étant mis en contact, on vienne, par l'action de la chaleur, à troubler l'équilibre de l'éther interstitiel. Toutes les molécules matérielles ne céderont pas avec une égale facilité au flux éthéré qui se développe progressivement, et le courant rencontrant une moindre résistance dans un certain sens, la circulation électrique prendra une direction parfaitement définie.

Froid produit par le courant.

Lorsque l'agitation devient assez puissante pour se propager au loin et donner naissance à un courant intérieur, si ce dernier rencontre un système moléculaire en rotation dirigé de telle façon que son mouvement soit contrarié par le flux éthéré, la vitesse des molécules sera tout d'abord diminuée, puis elle pourra changer de signe. En même temps la force vive du courant et la vibration moléculaire de la masse traversée éprouveront un notable affaiblissement. Donc quelquefois un courant pourra abaisser la température naturelle des molécules, lorsque sa direction se trouvera être contraire à celle de leurs rotations.

Telle est assurément l'explication d'un fait remarquable découvert par Peltier ; il a constaté que le même courant échauffe la soudure des deux métaux en la traversant dans un sens, et la refroidit lorsqu'il marche en sens opposé ; dans la seconde partie de l'expérience, la force vive du courant est employée à détruire et à renverser les mouvements rotatoires des molécules du métal. Le fait que nous discutons est sous un certain rapport comparable aux interférences lumineuses, mais il y a des différences capitales qui ne sont pas à négliger. L'observation a prouvé que lorsque le courant traverse la soudure, la température de celle-ci *baisse* si le courant est dirigé dans le *sens même* du courant thermo-électrique qui surgirait échauffant la soudure, de sorte qu'on ne peut supposer une interférence proprement dite entre les deux courants ; la soudure même, au contraire, *s'échauffe plus* que les parties voisines si elle est traversée par le courant en *sens opposé* à celui du courant thermo-électrique ; ainsi ne peut-on pas dire que le courant adventice agisse comme simple cause d'élévation de température.

Particularités intéressantes distinctives.

De plus, on a trouvé que la *différence de température* produite par le courant adventice est proportionnelle à *la simple intensité*,

pendant que la chaleur absolue produite par le même courant est proportionnelle *au carré* du même courant. Nous sommes donc en face de deux phénomènes de nature différente, et l'effet du refroidissement est d'ordre différent du travail thermique ordinaire, car il devrait être proportionnel au carré comme l'autre.

Sous ce rapport, le refroidissement serait analogue à l'action chimique qui est proportionnelle à la simple intensité, de sorte que le refroidissement serait dû, soit à une soustraction, soit à une condensation de l'éther. Mais laissant de côté ces suppositions, Il est certain que l'effet calorifique ordinaire l'emporte bien vite sur l'autre, et on ne peut pas employer de courants trop forts sans que le froid produit donne lieu à un échauffement.

Avec des courants énergiques, quelle que soit leur direction, on observe un effet thermométrique positif, mais il ne conserve pas la même valeur. Par exemple, avec un courant passant du fer au zinc, la température atteint 30° ; la propagation se fait-elle du zinc au fer, le thermomètre tombe à 13°; lorsque le courant passe du bismuth au cuivre, on a une variation thermométrique de — 4°, et de + 50° pour la direction contraire. Tous les métaux donnent lieu à des phénomènes du même genre ; mais en employant un barreau de bismuth, d'antimoine, le refroidissement est très-marqué : il atteint — 20°.

Tension des cristaux thermo-électriques.

Les courants thermo-électriques des métaux ont comme corrélatifs les effets de tension qui se manifestent sous l'action de la chaleur dans les cristaux thermo-électriques, tels que la tourmaline, la boracite, la topaze, le sucre, etc. Nous rappellerons succinctement ces expériences, car elles confirment que la direction du mouvement électrique dépend de la condition moléculaire. Les cristaux thermo-électriques proprement dits, présentent simultanément les deux états électriques opposés, et ils sont tous d'une telle configuration, que leurs extrémités ou pôles présentent des formes dissemblables. Les cristaux parfaitement symétriques et égaux dans toutes leurs parties ne donnent qu'une seule espèce d'électricité (Pianciani), probablement due à des actions chimiques ou à l'évaporation.

Leur dyssymétrie

Cette dyssymétrie dans la forme nous apprend que la distribution de l'éther à l'intérieur des cristaux n'est pas égale dans

tous les sens. Telle a été déjà notre conclusion lorsque, étudiant l'optique, nous avons vu le plan de polarisation dans le quartz tourner à droite ou à gauche, suivant la direction des faces plagiédriques.

La distribution inégale de la matière pesante dans la masse du cristal contribue puissamment à imprimer une direction définie au mouvement des atomes éthérés, après la rupture de leur équilibre. Dans les cristaux et dans les métaux la non-homogénéité de structure agit de même, d'où cette règle générale : *Les causes qui déterminent les courants dans les métaux produisent la tension électrique sur les corps isolants.*

Influence des formes cristallines.

Par une étude plus attentive des formes cristallines, on apprendra à reconnaître quels sont les divers éléments du problème, pourquoi avec certains cristaux le courant marche de la partie chaude à la partie froide, tandis que, avec d'autres, la direction est contraire. En un mot, il reste à faire au sujet des substances électriques par la chaleur le travail qui a été si heureusement poursuivi en optique sur les cristaux diaphanes. Déjà quelques faits intéressants sont acquis à la science. Récemment encore on croyait que le bismuth cristallisait en cubes, et il était fort difficile de comprendre comment il pouvait présenter une structure irrégulière. Il est démontré aujourd'hui que la forme cristalline de ce métal est un rhomboèdre très-voisin du cube ; dès lors le développement des courants d'origine calorifique se comprend, car toutes les conditions physiques qui déterminent une inclinaison du clivage dans un certain sens, contribuent à mettre l'éther intérieur en mouvement suivant une direction définie.

État électrique avec la température.

Dans un cristal isolant, l'agitation de l'éther est en rapport intime avec les phases du mouvement moléculaire thermique ; par conséquent, elle subit de grandes variations selon que la température est en période d'augmentation ou de décroissement, si bien qu'à une même extrémité l'état électrique du cristal change de signe quand, au lieu de s'élever, la température s'abaisse. Les propriétés de la tourmaline vérifient cette induction. Cette pierre prend effectivement une électricité différente selon que sa température monte ou descend. Au moment où s'effectue le changement de signe électrique, le cristal semble naturel ; mais on

saisit facilement toute la différence entre un tel état neutre et celui qui est l'indice d'une absence complète de modifications intérieures. On aurait donc grand tort de juger de l'état naturel absolu des corps isolants d'après leur neutralité apparente.

Polarité cristalline.

Les phénomènes de tension que manifestent les cristaux thermo-électriques présentent sous certains rapports d'étroites analogies avec ceux que nous observons dans les électro-moteurs chimiques. Les deux pôles d'une pile sont, avons-nous dit, électrisés contrairement lorsque le circuit n'est pas fermé, et le courant prend naissance aussitôt après la réunion des pôles. La seule différence, c'est que nous n'avons pas dans un cristal la faculté d'établir ou non le courant, car le cristal est par sa nature conducteur ou isolant.

Électro-moteurs thermiques comparés aux chimiques.

En résumé, les systèmes formés de substances électrisables par la chaleur sont de véritables électro-moteurs thermiques, de même que les piles voltaïques ordinaires sont des électro-moteurs chimiques. Dans les premiers, le mouvement électrique résulte de l'agitation de l'éther, de son déplacement produit par le mouvement vibratoire qui excède les limites de l'élasticité du fluide et peut-être encore de sa dilatation ; dans les autres, il prend naissance par suite de la distribution de l'éther en nouvelles atmosphères moléculaires au moment où les deux corps en présence, réunissant leurs molécules, forment un nouveau composé. De plus, considérant que dans toute genèse de courant la chaleur prend une part considérable au phénomène, il nous semble indispensable d'admettre que même dans les courants d'origine chimique, le flux est causé en très-grande partie par ces vibrations excessives qui sont la source de la rupture de l'équilibre et, par suite, de la translation de l'éther. Le sens des courants thermo-électriques dépend de la structure des circuits en vertu de laquelle ceux-ci livrent passage à l'éther dans telle direction plus facilement que dans telle autre, et à cette inégalité de résistance intérieure ne sont point étrangers les mouvements rotatoires des molécules dont l'orientation est variable comme nous le prouvent les diverses figures des cristaux. Dans le cas des courants chimiques, le sens du mouvement semble dépendre principalement de la quantité différente d'éther qui constitue l'atmosphère enveloppant chacune des molécules du conducteur.

La tension statique des cristaux ne suppose pas une translation de matière pondérable ; elle s'effectue par un simple déplacement de l'éther s'établissant de molécule à molécule en tout comparable à l'induction des corps isolants. D'où ces deux conséquences :

Conclusions générales sur la nature du courant.

1° Dans les mauvais conducteurs le mouvement de transport de l'éther est impossible, ce fluide ne pouvant circuler librement comme il le fait dans les métaux ; il faut supposer que dans les couches successives du milieu les atomes éprouvent un très-léger déplacement ; tous ces mouvements locaux et très-petits donnent une résultante finie à l'extérieur, laquelle constitue la tension électrique. Cette tension ne peut guère se résoudre autrement qu'en une vibration plus énergique, et une augmentation ou une diminution de la densité de l'éther qui reste dans le corps.

Impossibilité que le courant soit exclusivement formé par la matière pesante.

2° Quand un cristal s'électrise, on ne peut affirmer que la tension soit produite par un changement d'équilibre de la matière pondérable du solide ; ce défaut de certitude nous autorise à penser que, dans le développement d'un courant électrique au sein d'un bon conducteur, il y a autre chose que la mise en mouvement de la seule matière grossière. Ce transport peut exister, à la vérité, mais seulement lorsque des molécules sont détachées par la violence du flux éthéré. Les choses étant envisagées de la sorte, tous les phénomènes deviennent explicables ; tandis qu'au contraire, dans la plupart des cas, l'esprit se refuse à admettre un flux de molécules pesantes. Est-il possible en effet de donner une telle origine au courant lorsqu'on voit, par exemple, les courants thermo-électriques excités par une simple vibration lumineuse, et les courants magnéto-électriques produits par le seul renversement d'un aimant. Inutile d'ajouter que l'on n'a jamais constaté les moindres traces de transport moléculaire dans les conducteurs traversés par ces courants. Le courant ne traverse ni le vide ni les milieux diaphanes, ou du moins dans ceux-ci le courant ne passe qu'avec la plus grande difficulté et en les décomposant partiellement. Pendant longtemps cette faculté isolante du vide s'est présentée à nous comme une sérieuse difficulté, et cependant elle est bien selon la nature des choses. En effet, ce que nous appelons vide n'est que l'éther homogène, et dans une masse fluide

de densité partout uniforme un courant ne peut prendre naissance : supposons un ébranlement de la masse en un point quelconque de son étendue, il produira une vibration rayonnante s'étendant de tous côtés, mais jamais un courant, qui suppose essentiellement une variation relative de densité ou de pression dans les diverses parties du fluide. Établissons donc deux classes de milieux : les uns admettent de préférence les mouvements transversaux de l'éther, les autres se laissent traverser principalement par les mouvements longitudinaux.

Conclusion finale.

Concluons : *le courant est un mouvement de translation de la matière impondérable s'effectuant au travers de la matière pondérable dont quelques molécules sont parfois entraînées par le flux ethéré.*

Les choses étant entendues de la sorte, nous dirons souvent et avec justesse, courant éthéré au lieu de courant électrique ; néanmoins, conformément aux remarques faites dans le livre I, chap. II, le mot électricité sera conservé, et ce ne sera pas sans avantages. Ne savons-nous pas que la pression barométrique, le son, le vent, sont des modes de mouvement propres à un même fluide, l'air, et qu'il est cependant fort utile de donner à chacun de ces phénomènes un nom spécial ; de même il est convenable de continuer à distinguer l'éther à l'état de tension, de l'éther à l'état de courant, en maintenant les anciennes dénominations. Déjà au sujet des vibrations transversales de l'éther, ces réflexions nous avaient arrêté quelques instants, et nous avions reconnu l'utilité des deux termes : radiations calorifiques et radiations lumineuses, employés concuremment, chacun ayant une acception différente

CHAPITRE VIII

PROPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES CORPS. — RÉSULTATS FOURNIS PAR L'ÉTUDE DES TRANSMISSIONS TÉLÉGRAPHIQUES.

Distinction des corps en conducteurs et isolants.

Les corps se partagent en deux grandes classes : les isolants et les bons conducteurs ; en outre, certaines substances ne présentent qu'une conductibilité imparfaite, ce qui tient, soit aux impuretés

qu'elles renferment, soit à ce qu'elles sont mélangées à des liquides d'une facile décomposition. Citons comme exemple les corps à moitié vitreux et métalliques et les substances organiques. Le pouvoir isolant ou conducteur ne dépend nullement de la nature chimique, mais de l'état d'agrégation moléculaire. Ainsi le carbone, soit amorphe, soit graphitoïde, conduit l'électricité, et à l'état de diamant, il n'a plus cette propriété. A quelques exceptions près, on peut poser comme une grande loi physique que les meilleurs conducteurs sont les métaux et que les corps parfaitement isolants sont les verres, les résines et les pierres précieuses.

Parallélisme avec la lumière.

Nous avons signalé plus haut entre les propriétés électriques des corps et leur mode d'action sur la lumière, des similitudes telles que dans les deux cas les phénomènes paraissent dus à la même cause sous des modalités différentes. La distinction des corps en isolants et en conducteurs est parallèle à celle déjà établie précédemment entre les matières qui font éprouver à la lumière la polarisation rectiligne et celles qui la polarisent elliptiquement.

Les types caractéristiques de nos séries sont les corps diaphanes pour les isolants, et les métaux pour les conducteurs : aussi les dénominations corps vitreux[1] et corps métalliques désigneront collectivement les substances appartenant à l'une et à l'autre des deux grandes classes dont nous avons parlé. Ces mots seront pris avec leur acception la plus large, car parmi les diaphanes nous compterons des substances qui rendues opaques par leur mélange avec quelque matière étrangère n'en sont pas moins de natnre vitreuse ou résineuse, et de même parmi les métaux nous rangerons tous les composés minéraux qui en ont l'aspect et les propriétés.

Ces états ne sont pas absolus.

Les expressions précédentes seraient très-avantageusement remplacées par d'autres plus générales, mais nous ne voulons pas essayer du néologisme ; toutefois il importe de ne pas se méprendre sur le contraste que nous caractérisons ici. Par exemple, l'or, l'argent, ne cessent pas d'être conducteurs alors qu'ils sont amenés à l'état de feuilles assez minces pour être transparentes. Cependant, sous cette forme, ils opposent une grande résistance au mouve-

[1] Vitreux nous semble préférable à diaphanes, parce que de nombreuses substances isolantes sont opaques, exemple les verres noirs.

ment électrique, et plusieurs physiciens distingués les placent au nombre des demi-conducteurs. Le verre chauffé au rouge perd sa transparence, mais devient conducteur. D'un autre côté les corps doués du pouvoir d'isolation le plus complet, se laissent toujours pénétrer un peu par l'électricité et la transmettent en petite quantité dans leur masse.

On s'explique par là comment un condensateur chargé n'est jamais ramené à l'état naturel du premier coup, et donne plusieurs étincelles d'intensité décroissante ; comment aussi la lame isolante d'un condensateur est percée lorsque la charge de l'appareil surpasse une certaine limite, et enfin pourquoi cette même lame présente, après plusieurs décharges, une sorte de désagrégation et de décomposition dans ses couches superficielles.

Mobilité de l'éther dans les métaux.

Au livre II, chap. VIII, nous avons indiqué comment l'action des métaux sur la lumière suppose une certaine mobilité de leurs molécules qui est la cause déterminante de l'extinction rapide des rayons : actuellement, nous voyons que cette mobilité n'est pas spéciale à la matière pondérable, mais elle se rencontre développée à un haut degré dans les molécules de la matière impondérable, et l'on arrive à se demander si la polarisation elliptique ne serait pas un effet de la mobilité des atomes éthérés.

Mouvement électrique dans les conducteurs

Avant de chercher les conditions de structure qui font d'un corps un isolant ou un conducteur, il importe d'étudier les lois de la propagation du mouvement électrique à l'intérieur des corps. Nous serons à même ensuite de vérifier les conclusions du chapitre précédent et nous acquerrons des renseignements utiles pour éclairer la nature du mouvement électrique.

Le passage de l'électricité dans les conducteurs présente deux phases distinctes, savoir : l'état initial, alors que le mouvement commence dans le conducteur, et l'état définitif, quand le flux électrique continue à traverser le conducteur. Les phénomènes considérés précédemment avaient tous rapport à l'état définitif, il faut maintenant examiner les particularités de l'action du courant à l'état initial ; disons, par avance, que les faits dont nous allons parler sont très-propres à dissiper les quelques doutes que l'on pourrait avoir encore sur la nature du courant.

État initial.

Il était réservé aux physiciens modernes de faire une semblable

étude, car l'électricité se propageant avec une vitesse incroyable, les expériences étaient possibles seulement avec des conducteurs ayant une longueur considérable. Les fils télégraphiques ont permis d'entreprendre des recherches sur une vaste échelle et, de plus, au grand avantage de la science, la pratique journalière de la télégraphie a révélé des faits très-importants. Résumons les faits les plus utiles à notre sujet, et, avant tout, définissons la vitesse de l'électricité.

La vitesse de l'électricité est mesurée par l'espace que parcourt en l'unité de temps sur un fil conducteur une action de nature électrique susceptible de produire un effet déterminé. Une telle définition paraîtra probablement un peu vague, mais pour l'instant nous ne pouvons être plus explicite. Définition de la vitesse de l'électricité

L'effet obtenu peut être ou une étincelle électrique, ou la déviation d'une aiguille aimantée, ou l'aimantation d'un fer doux. Ainsi lorsqu'un fil très-long, mettant en communication les deux armures d'une bouteille de Leyde présente trois solutions de continuité, l'une au milieu et l'autre voisines aux armures, on constate une différence entre les instants où l'étincelle éclate dans les deux points (Wheatstone). On arriverait à des résultats analogues en introduisant dans un même circuit, soit deux appareils télégraphiques, soit deux galvanomètres, l'un très-voisin de la pile et l'autre très-éloigné. On peut avoir aussi recours à une décomposition chimique opérée dans des voltamètres échelonnés à de grandes distances les uns des autres; on voit l'électrolyse ne pas commencer au même instant dans chacun des appareils. Quelle que soit la méthode suivie, d'après le temps écoulé entre les manifestations d'un même effet électrique en deux points séparés par une distance connue, on pourra calculer la vitesse de l'électricité.

Plusieurs expérimentateurs ont traité le problème de la vitesse de l'électricité, mais les valeurs obtenues sont notablement divergentes. Wheatstone déchargeant une bouteille de Leyde à travers un fil métallique suspendu par des cordons de soie dans une longue galerie et repliés en parties parallèles, déterminait le temps écoulé entre la manifestation des étincelles extrêmes et l'apparition de celle du milieu; il trouva une vitesse de 461,000 kilomètres par seconde. Fizeau et Gounelle étudiant la vitesse du Résultats de l'expérience

courant voltaïque dans les fils télégraphiques, obtinrent comme résultat 180,000 kilomètres et de plus ils remarquèrent qu'il se produisait une espèce de réflexion dans l'intérieur du fil. Walker et Mitchell hésitent entre 40,000 et 45,000 kilomètres. Enfin d'une série d'expériences entreprises sur le câble qui traverse la Manche, on conclut que la vitesse était seulement de 4,300 kilomètres. Une telle discordance entre les résultats fournis par divers observateurs ne pouvait être attribuée à l'influence de la matière des conducteurs ou aux erreurs d'observation.

Distinction à faire.

Une étude sérieuse de la question apprit que dans toutes ces expériences il fallait distinguer deux choses bien différentes : 1° le temps employé par le conducteur à acquérir une tension telle qu'il soit capable de produire un effet déterminé, par exemple une étincelle, une attraction, une décomposition chimique ; 2° le temps nécessaire à la pulsation, c'est-à-dire à l'onde électrique, ou, si l'on veut encore, aux molécules éthérées pour parcourir une longueur de fil donnée. Or les observateurs ne peuvent que saisir le moment où il est possible au fluide de signaler son passage ; il ne leur est donc seulement permis que de résoudre la première partie du problème ; la seconde subsiste tout entière et sa solution ne sera pas la même suivant la théorie acceptée pour expliquer le mouvement électrique.

Influence de l'induction.

La diminution de vitesse éprouvée par le courant en traversant les câbles sous-marins tient évidemment à des phénomènes d'induction. En effet, un fil submergé se charge comme une véritable bouteille de Leyde ; le fil de cuivre représente l'armure intérieure, la gutta-percha est le corps isolant intermédiaire, enfin l'enveloppe protectrice en fer et l'eau de mer environnante tiennent lieu d'armure extérieure. Par conséquent, le fil, pour prendre dans toute sa longueur une tension susceptible de produire un effet voulu, emploira un certain temps ; de même que nous voyons une machine électrique charger une plaque conductrice libre plus rapidement que la feuille d'étain d'un carreau fulminant, les deux surfaces ayant d'ailleurs une égale étendue.

Observations de Latimer Clark.

Ces observations confirment la remarque déjà faite par Volta, qu'une pile, malgré sa force de reproduction électrique, emploie toujours quelques instants à charger une batterie, d'où il con-

clut que la nouvelle source électrique trouvée par lui, malgré sa grande abondance, ne produit qu'une quantité limitée d'électricité dans un temps donné. M. Latimer Clark, ayant mis un fil télégraphique souterrain, long de 1490 milles, en relation avec trois galvanomètres, un au milieu et les deux autres aux extrémités, fit passer dans la ligne un courant de 500 couples; il vit les aiguilles se déplacer l'une après l'autre, la plus éloignée plus tardivement que celle qui était voisine de la pile, et il observa même une différence supérieure à une seconde; mais la différence fut inappréciable en expérimentant sur un fil aérien[1]. De plus, sur les galvanomètres du milieu et de la fin, les aiguilles se mouvaient lentement, tandis que, dans le premier, il se produisait une brusque déviation au moment de la fermeture du circuit, de telle sorte que si, à l'aide d'un mécanisme réglé par un pendule, on ouvrait et on fermait le circuit de seconde en seconde à l'extrémité du fil, la discontinuité du courant était complétement effacée, et il sortait du fil un flux continu. Le fil a joué dans ce cas le rôle d'un grand récipient régulateur à l'aide duquel on uniformisait le cours irrégulier et intermittent du fluide. De là sont venues de sérieuses difficultés dans la transmission des signaux au moyen des câbles sous-marins et la nécessité de tenir le fil toujours plein, c'est-à-dire de ne le jamais décharger complétement.

Explication des différents résultats.

Tous ces faits nous apprennent que si dans les recherches sur la vitesse de l'électricité, entreprises jusqu'ici par divers observateurs, les résultats obtenus sont très-différents les uns des autres, ces divergences tiennent uniquement aux phénomènes d'induction qui s'établissent entre les fils et les corps environnants. Dans les expériences, on ne peut jamais éviter les effets de cette induction; de plus, ils varient avec la nature des milieux traversés par les fils; par conséquent, comme tous les observateurs n'ont pas expérimenté dans des conditions semblables, il leur a été impossible de trouver des résultats comparables.

La véritable vitesse est inconnue

Donc nous ne connaissons pas encore la vitesse réelle de l'onde éthérée dans l'intérieur d'un fil. M. Hughes, très-connu dans l'art de la télégraphie, a observé qu'en employant des appareils extrê-

[1] Voy. *Report of the joint committee for the submarine telegraph*. London, 1862, p. 304 et 305.

mement délicats, on obtient des signaux avec une rapidité d'autant plus grande, que les machines sont plus sensibles, et il en conclut que la transmission serait instantanée si le conducteur était absolument libre : telle est aussi l'opinion de M. l'abbé Capelli; d'autres physiciens encore ont émis la même opinion en se fondant sur les faits observés par Wheatstone. Cette conclusion est réellement inadmissible, et il nous semble beaucoup plus rationnel d'admettre avec M. Marié-Davy que la vitesse de l'électricité est identique à celle avec laquelle se propage une pression dans l'éther libre, c'est-à-dire à la vitesse de la lumière[1]. Cette conclusion est confirmée par les dernières observations des physiciens anglais. D'après M. Marié-Davy, la valeur assignée par Wheatstone à la vitesse de l'électricité ne doit pas être rejetée, parce qu'elle est supérieure à celle de la lumière, car on pourrait la réduire à ce nombre sans dépasser les limites des erreurs possibles. Mais, cette seule considération ne saurait nous décider à repousser le chiffre des savants anglais, aujourd'hui que les expériences de Quinke ont appris que la lumière se propage plus rapidement dans les métaux que dans le vide.

La vitesse n'est pas infinie.

Expérience chimique.

La théorie, d'accord avec l'observation, nous montre que dans les conducteurs ordinaires le courant ne parvient pas instantanément au maximum de son intensité sur toute la longueur du fil, mais qu'au contraire il y arrive peu à peu ; si par exemple un télégraphe électrochimique de Bain communique avec un fil souterrain d'une assez grande longueur, on observe que le trait marqué par le style au moment de l'arrivée d'un courant est d'abord très-grêle, et augmente graduellement de largeur, il se présente ainsi a ——— b. Inversement, lors de la cessation du courant, le trait ne se termine que graduellement en diminuant d'épaisseur a′ ——— b′.

Déversement de la ligne aux deux bouts.

Supposons trois galvanomètres intercalés dans un fil de ligne, un à chacune des extrémités et l'autre au milieu, puis le fil ayant été chargé, on met au même instant ses deux bouts en communication avec la terre, on voit que les galvanomètres extrêmes sont aussitôt déviés, mais celui du milieu ne se met en mouve-

[1] Voy. Marié-Davy, *Recherches sur l'électricité considérée au point de vue mécanique*, p. 61.

ment que quelques instants après. Cette expérience prouve que le conducteur se décharge dans le sol par ses deux extrémités à la fois, et voilà pourquoi dans la pratique de la télégraphie, lorsqu'on rompt la communication d'une pile avec un fil, on met aussitôt l'extrémité par où entrait le courant en rapport avec le sol, afin de ramener le fil plus promptement à l'état naturel.

Les diverses expériences citées jusqu'ici ne nous font donc pas connaître la vitesse de l'électricité, mais seulement combien il faut de temps à un fil d'une longueur déterminée pour arriver à une certaine tension; elles nous apprennent de plus que le courant peut se propager dans une direction contraire à celle de la charge initiale.

Plusieurs géomètres éminents ont appliqué le calcul à la recherche de la loi suivant laquelle croît la tension d'un courant. Leurs conclusions ont été les suivantes : la courbe représentative de l'intensité d'un courant n'est pas la même au commencement et à la fin; en outre, lorsque le circuit restant fermé le flux électrique est continu, on a dans le fil une tension asymptotique *abc* (fig. 35) que l'on peut regarder comme sensiblement constante. Le courant éprouve-t-il une courte interruption, il se produit dans le fil une sorte d'onde ayant la forme *mnp* (fig. 35); si le fil est **Résultats théoriques.**

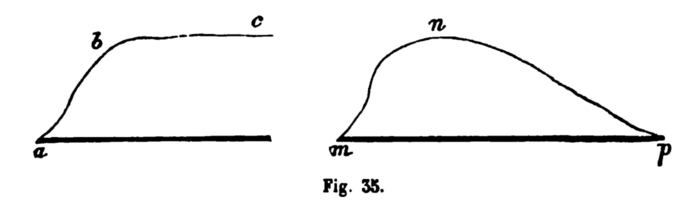


Fig. 35.

très-long et si l'onde éprouve un retard par effet d'induction, les ondes s'aplanissent et se confondent les unes avec les autres, de telle sorte qu'à la sortie du fil elles produisent un courant continu, bien qu'elles se soient développées isolément. Ces conclusions ont été vérifiées expérimentalement.

Il est difficile, pour ne pas dire impossible, d'expliquer ces phénomènes par l'assimilation du courant à un simple mouvement vibratoire; toute difficulté disparaît, au contraire, en le regardant comme un transport de fluide. Et dans cette hypothèse, **Explication de ces résultats**

lorsqu'on veut s'expliquer les effets du courant électrique, il suffit d'analyser comment les choses se passent dans les cas analogues de l'écoulement des fluides matériels.

Comparaison empruntée à l'hydraulique.

Supposons (fig. 36) un réservoir R constamment plein d'eau, communiquant avec un canal AB, ayant une section rectangulaire et des parois verticales de même hauteur que celles du réservoir.

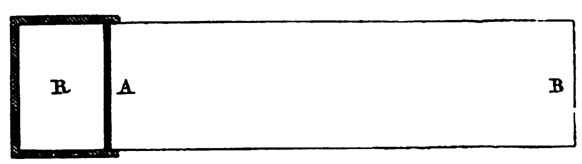


Fig. 36.

Le canal présente deux vannes, l'une A à la jonction du canal avec le récipient, l'autre B à l'extrémité opposée. Trois cas peuvent se présenter : 1° l'ouverture B étant libre et la vanne A fermée, le canal est vide. Si alors on soulève la vanne A, l'eau se précipite dans le chenal avec une vitesse proportionnée à la charge et forme un *front b* (fig. 37), dont la hauteur dépend d'abord de la résistance des parois et du fond, ensuite de la largeur de la coursière[1]. Ce premier temps de l'écoulement est dit l'état initial du mouvement dans le canal.

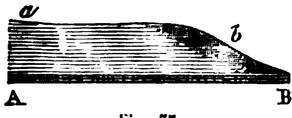


Fig. 37.

Premier cas.

On comprend que si la section du canal est partout la même et égale à l'ouverture d'admission, le temps que met le bief à se remplir est indépendant de sa largeur. Dans le cas où, au contraire, le bief présente des étranglements et des renflements, il se produit des remous, et il se remplit plus lentement (Venturi). A cet état variable succède un écoulement continu. Dans ce premier cas, le mouvement initial présente le même sens que le courant définitif, et arrive avec le front de l'onde à l'orifice libre du canal en même temps que l'eau qui tout à l'heure se trouvait au niveau de l'ouverture du récipient.

[1] On observe de beaux exemples de *front* présenté par une masse liquide, lorsqu'un torrent vient à déborder en brisant les chaussées, ou après une pluie orageuse d'été, ou bien encore lorsque les vagues de la mer se soulèvent dans un couloir. Toutes ces comparaisons sont empruntées en grande partie à M. Marié-Davy.

2° Supposons maintenant l'orifice de décharge B fermé, et celui d'admission A ouvert, le bief sera plein ; on soulève alors la vanne B ; le liquide s'écoule aussitôt, en même temps une onde se forme à la surface de l'eau du canal, et se propage à raison d'une fraction de mètre par seconde, c'est-à-dire avec la vitesse de transmission des ondes au sein d'une eau tranquille. Mais ici le sens du mouvement ondulatoire développé à la surface de la masse fluide dans le premier instant de l'écoulement est contraire à celui du flux, définitivement établi, lequel flux a commencé à s'établir au niveau de l'orifice de décharge et s'est propagé dans le canal des parties les plus éloignées vers le réservoir. Enfin il est évident que la forme de la surface libre de l'eau pendant l'état variable ne sera pas le même dans ce deuxième cas que dans le premier. Deuxième cas.

3° Enfin, on peut imaginer que le bief étant rempli, et l'eau ayant un écoulement uniforme, on sépare complétement le canal du réservoir, les orifices A et B restant ouverts, l'eau s'échappera par les deux extrémités à la fois, et le bief se videra. Comme toute la masse liquide était primitivement animée d'un mouvement de translation dans une direction déterminée, à l'une des extrémités de la masse ce mouvement devra changer de sens, et la couche supérieure du liquide ne présentera pas la même configuration, dans la partie *a* (fig. 38), voisine de A, et dans celle *b*, voisine de l'ouverture B. Si l'eau avait été primitivement en repos dans le canal, elle se serait déchargée également des deux côtés. Troisième cas.

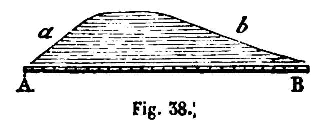


Fig. 38.

Ces trois cas particuliers de l'écoulement du liquide contenu dans un canal nous donnent une idée très-juste de ce qui arrive lorsqu'une pile est mise en communication avec un long conducteur. Le premier nous montre comment les choses se passent dans un fil dont l'extrémité la plus éloignée est en communication avec le sol. Le fil employant, comme nous l'avons dit, un certain temps à se charger, les trois galvanomètres doivent dévier l'un après l'autre, car l'aiguille de chacun d'eux ne peut s'agiter que si, dans la portion correspondante du fil, la tension a atteint un degré suffisant pour produire cet effet dynamique. Quand les tuyaux de Application du premier cas au courant électrique.

conduite présentent de nombreux renflements, l'eau remplit d'abord ces cavités avant de parvenir à l'extrémité, et son mouvement éprouve un retard, circonstance déjà signalée plus haut. De même, dans un câble submergé, l'électricité ne passe au delà d'un point donné qu'après la charge du condensateur formé par l'eau et par la partie du câble qui précède ce point. Semblablement, le mouvement électrique est retardé dans un fil notablement résistant. Hipp a trouvé que la transmission s'effectuait dans de gros fils plus rapidement que dans des fils fins deux cents fois plus courts, bien que la résistance absolue fût la même dans les deux conducteurs[1].

Du deuxième cas.

Le second cas de l'écoulement des fluides que nous avons exposé ci-dessus représente de quelle manière un fil préalablement chargé dans sa longueur revient à l'état naturel au moment où l'on met son extrémité en communication, soit avec le pôle négatif de la pile, soit avec le sol. En effet, c'est le galvanomètre le plus éloigné du pôle positif de la pile qui indique le premier une déviation, et plus tardivement l'aiguille du rhéomètre voisin de ce pôle entre en mouvement.

Du troisième cas.

Enfin, dans le troisième cas, les choses se passent de même que lorsqu'un câble, chargé et isolé, communique par ses deux extrémités avec le sol : les rhéomètres extrêmes, au moment du contact, sont aussitôt déviés, chacun d'eux indiquant un courant de sens différent. A ce propos L. Clark fait remarquer qu'une onde électrique ayant commencé à parcourir un fil, peut revenir sur elle-même, si bien qu'il est possible, jusqu'à un certain point, de faire revenir au poste de départ la dépêche télégraphique que l'on vient de lancer dans un fil.

Durée de l'état variable.

Le temps employé par les fils aériens pour arriver à l'état permanent ou la durée de l'état variable quoique très-court, est néanmoins parfaitement mesurable; Guillemin[2] l'a trouvé de $0^s,024$ en opérant sur un fil télégraphique aérien long de 500 kilomètres. Cet observateur plaça dans le circuit à l'extrémité voisine de la pile un interrupteur dont la pièce principale était une lame triangulaire fixée sur un cylindre tour-

[1] Voy. B. U., *Archives des sciences naturelles*, 1859, vol. IV, p. 350.
[2] *Comptes rendus*, t. L, p. 184.

nant. Un ressort pouvait presser la surface du triangle en un point plus ou moins rapproché du sommet, et il donnait la mesure du temps pendant lequel le circuit demeurait fermé, car la vitesse de rotation du cylindre était connue exactement. Il trouva ainsi que si la durée du contact augmentait graduellement, le galvanomètre mis en communication avec l'extrémité éloignée du fil indiquait une déviation croissante jusqu'à ce que la durée du passage eût atteint une valeur maximum qui, dans le cas considéré, était de 0^s,024, alors la déviation restait constante. Les résultats obtenus par Guillemin sont applicables seulement à la ligne qui a servi aux expériences ; évidemment avec un autre fil, isolé d'une façon différente, les valeurs ne seraient plus les mêmes. Lorsque le rhéomètre est interposé dans la partie du circuit voisine de l'interrupteur, on constate d'abord un courant énergique, puis l'intensité décroît, et quand la durée de la fermeture du circuit acquiert cette même valeur 0^s,024, le courant devient constant.

Nous voyons par là que l'électricité en se précipitant dans un conducteur vide y pénètre avec une très-grande vitesse initiale, puis le mouvement se ralentit à mesure que la charge augmente.

Nous verrons les phases de ces mouvements analysés avec plus de détails en parlant des courants d'induction, et l'analogie avec les courants fluides deviendra encore plus frappante. Nous ne disons pas qu'il soit impossible d'expliquer tous ces faits par l'assimilation du courant électrique aux mouvements vibratoires, car ces démonstrations ne sont pas d'une telle rigueur et l'intelligence humaine n'a pas une pénétration à ce point si puissante qu'il nous soit permis de déclarer une chose impossible. Nous voulons dire simplement que l'explication des phénomènes cités précédemment nous semble inabordable, quand on ne suppose pas l'existence d'une translation continue ou tout au moins d'une suite de pulsations avec un véritable transport de fluide ; et nous ne concevons pas quelle idée on peut s'en faire en regardant le courant comme un simple mouvement vibratoire.

Hypothèses pour l'expliquer.

Quelques-uns admettent une espèce de radiation le long du conducteur suivie d'une absorption analogue à celle produite par les milieux colorés ou par les corps thermochroïques ; ils comparent encore la transmission de l'électricité dans un fil à la

Le couran n'est pas une vibration.

propagation de la chaleur dans une barre ; mais alors les phénomènes dont nous avons parlé devraient présenter un tout autre caractère. Cette manière de voir ne nous apprend pas pourquoi la rapidité avec laquelle le mouvement électrique envahit un conducteur dépend de l'intensité de la vibration qui lui a donné naissance et de la grosseur du fil qui lui livre passage ; bien plus, les faits en question sont contraires à une telle hypothèse ; l'intensité de l'impulsion et la section du conducteur n'exerçant aucune influence sur la vitesse de transmission d'un mouvement vibratoire. En outre, la théorie que nous discutons exige l'introduction d'une foule d'hypothèses toutes gratuites afin d'expliquer comment, dans des conditions déterminées, le mouvement électrique revient sur lui-même le long d'un fil, et comment on peut, à l'exemple de Latimer Cark, reprendre dans un fil télégraphique une partie de la dépêche qui vient d'y être envoyée, résultat facile à obtenir en rompant le circuit avant l'arrivée de l'onde électrique à l'extrémité de la ligne. Enfin, comme dernier argument, la loi de Ohm, relative à la tension ou aux forces électromotrices, est identique à celle que l'on observe en expérimentant sur les fluides coulant dans des tubes munis de piézomètres, comme nous le verrons tout à l'heure[1]. Donc le courant est bien un mouvement comparable à l'écoulement des fluides.

Mais bien un flux.

Dans notre argumentation, nos exemples ont été empruntés aux transmissions électriques dans des fils soumis à des inductions énergiques, dans les câbles télégraphiques par exemple ; mais on les observe aussi, à la vérité avec une moindre intensité, en expérimentant sur les fils aériens ; les recherches de Guillemin ne laissent aucun doute à ce sujet ; aussi doit-on reconnaître que, dans les deux cas, le mode de transmission ne diffère pas quant au mécanisme.

Double propagation du mouvement dans es fluides.

Du reste, rien n'empèche d'admettre l'existence dans le fil de quelque réaction due à l'élasticité de l'éther, et il se peut parfaitement que la vitesse de translation propre à l'onde électrique soit la même que celle du mouvement vibratoire. Quelques exemples rendront notre pensée plus claire. Considérons (fig. 39) à nouveau

[1] Voir page 427.

le récipient R, incessamment rempli d'eau, dont nous avons déjà parlé, et supposons-le mis en communication, non plus avec un canal à ciel ouvert, mais avec un tuyau de conduite AB fermé à son extrémité libre B. Quand on abaisse la valve fermant cette extrémité, il se produit en ce point une variation de pression qui, en

Premier exemple.

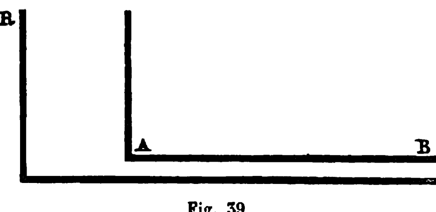


Fig. 39.

vertu de l'élasticité du liquide, se propage jusqu'au récipient avec une vitesse égale à celle du son dans l'eau, soit 1,400 mètres par seconde. Or cette pression est celle qui permet à l'eau de sortir incessamment par l'orifice du tube sans que ce tube soit jamais vidé ; par conséquent, elle doit être transmise avec une vitesse supérieure à celle que prend le liquide en s'échappant par l'ouverture du conduit. Cela est si vrai que le jet est très-faible au commencement, et ne devient plein que quelque temps après l'ouverture de l'orifice ; nous verrons tout à l'heure les expériences qui reproduisent pour l'électricité cette phase du mouvement liquide.

Autre exemple.

Voici un autre exemple. Imaginons un long corridor, éclairé par deux fenêtres placées chacune à une de ses extrémités ; l'une de ces fenêtres est fermée et pressée par le vent soufflant du dehors ; l'autre est à demi-close. Lorsqu'on ouvre la première, aussitôt la seconde se ferme. C'est là un effet de la compression exercée sur l'air intérieur par le mouvement des battants : pression qui s'est propagée avec une vitesse égale à celle du son dans le gaz, et qui, par conséquent, a fait sentir son action sur toute la longueur du couloir, bien avant que cette même distance ait été franchie par le vent. On peut expliquer par une action du même genre pourquoi une étincelle jaillit simultanément sur les deux extrémités d'un long fil approchées à une distance convenable des armures d'une bouteille de Leyde chargée, car alors c'est la tension seulement qui se transmet à travers la couche isolante, placée entre

La vitesse de l'électricité comparable à celle de la lumière.

les armures avec une vitesse au moins égale à celle de la lumière, et aussitôt l'éther passe de ces armures dans le fil, ou du fil dans les armures, sans parcourir effectivement le fil conducteur dans toute son étendue. Lorsqu'on pratique vers le milieu du fil une solution de continuité, l'étincelle qui éclate en ce point retarde sur les étincelles extrêmes, parce qu'elle est produite par la décharge réelle en mouvement sur le conducteur. De cette manière, on rend compte des phénomènes de la bouteille de Leyde sans recourir à l'hypothèse des deux fluides. Toutes ces observations nous conduisent à dire que les fluides peuvent propager le mouvement de deux manières différentes : dans certains cas, la vitesse de transmission varie exclusivement comme l'élasticité du milieu ; dans d'autres, elle est la résultante des pressions extérieures ; et si la durée de l'état *initial* d'un canal dépend des conditions du conduit, cela tient à l'influence de ces pressions extérieures. Les choses se passant de la sorte dans les masses fluides, pourquoi n'en serait-il pas de même pour les mouvements électriques dont l'analogie avec les premiers est frappante?

Conclusion importante.

Analogie des fils électriques avec les tubes.

L'ensemble des faits connus nous conduit à croire que les physiciens versés dans l'étude de la télégraphie n'ont pas tort quand ils parlent de l'électricité comme d'un fluide en mouvement, et quand ils appliquent au courant électrique la terminologie de l'hydrodynamique[1]. Pour eux, non-seulement les fils conducteurs fonctionnent exactement comme de véritables tuyaux de conduite, mais encore la pile fait l'office d'un réservoir plus ou moins vaste et prompt à se remplir. En effet, plus la force électromotrice de la pile est intense, et plus promptes aussi sont les communications télégraphiques ; autrement dit, les conducteurs se remplissent alors très-rapidement, et ce résultat ne s'obtient pas en donnant à la pile seulement une tension énergique, il faut encore que, grâce à une puissante action chimique intérieure, la source électromotrice produise une quantité abondante d'électricité dans un temps donné. C'est pourquoi la pile de Bunsen offre un avantage réel sur celle de Daniell, non-seulement sous le rapport de la tension, mais aussi de la quantité[2].

V. L. Clark, *Rapport* cité, p. 294, n° 14.
Voici un fait très-propre à montrer que la force des piles n'est pas indéfinie

La théorie nous fournit encore plusieurs conséquences utiles au point de vue pratique.

1° Les dimensions du conducteur étant supposées constantes et la tension de la source invariable, la durée de la transmission varie en raison inverse de la conductibilité. Lois de la propagation du courant télégraphique.

2° La conductibilité et les sections du fil ne changeant pas, cette même durée est directement proportionnelle au carré de la longueur du fil[1].

3° Toutes les autres conditions demeurant les mêmes, la durée de la transmission est en raison inverse de la section.

4° La durée de la transmission est indépendante de la tension de la source.

La deuxième loi a été trouvée généralement exacte, et si elle ne se vérifie pas rigoureusement dans les recherches de Guillemin citées plus haut, cette exception doit être attribuée à l'isolation imparfaite des fils[2]. Cette loi montre encore que le courant fait un travail en se propageant dans le fil.

Des expériences faites par Latimer Clark et par Hugues sur les lignes télégraphiques ont établi l'exactitude de la dernière loi. Avec une pile de 10 éléments et une autre de 500 éléments, la vitesse de transmission était la même, seulement la largeur et l'intensité des traits de la dépêche étaient différentes. Les fils revêtus de substances isolantes, et soumis, par suite, à des effets d'induction, se comportent comme de très-larges conducteurs ; mais les lois restent les mêmes.

Nous avons déjà dit qu'on a cru pouvoir assigner comme cause efficiente du courant un mouvement de vibration, par la raison que les formules établies dans cette hypothèse concordent avec les résultats fournis par l'observation. Mais nous répéterons que toutes Objection. Réponse

Quatre éléments d'une pile à sable, équivalant à un couple Bunsen, suffisent pour mettre en mouvement un moteur électro-magnétique de Froment ; mais, lorsque la pile à sable a travaillé pendant quelques heures, elle s'affaiblit beaucoup et a besoin de repos. Après une heure d'inactivité, elle reprend son énergie première pour s'affaiblir de nouveau un peu plus tard, et ainsi de suite ; ces piles, à action intermittente, peuvent fonctionner de la sorte pendant une année entière.

[1] Nous trouvons ici une des raisons à cause desquelles les observateurs qui se sont occupés de la vitesse de l'électricité ont trouvé des valeurs différentes. Les résultats ne pouvaient concorder, puisqu'ils employaient des fils d'inégale longueur.

[2] Voy. Gaugain, *Annales télégraphiques*, vol. III, p. 147, et vol. IV, p. 117 et 126.

les formules des mathématiciens, alors même que leurs moindres conséquences sont confirmées par les expériences des physiciens, ne nous apprennent rien sur la nature du courant électrique, et ne peuvent nous faire reconnaître si le courant est un mouvement de translation ou une vibration. De même Fourier, après ses beaux travaux analytiques sur la chaleur, se trouva dans l'impossibilité de décider si le calorique était une subtance ou un mouvement. Quant aux lois de Ohm, sur lesquelles on a insisté, elles sont relatives aux tensions et se rapportent spécialement à l'état variable, sans fournir aucune donnée positive sur l'état définitif du courant. Gaugain ayant prouvé expérimentalement qu'elles sont également vraies pour les corps isolants, on en a conclu qu'elles s'appliquent aux bons conducteurs, parce que, au point de vue de l'électricité, aucune différence bien tranchée ne sépare ces deux classes de corps.

Dans les substances isolantes, la transmission directe n'existe réellement pas ; il se développe seulement une certaine disposition moléculaire nommée induction, dont il nous faudra faire une étude particulière. Mais auparavant poursuivons l'examen des autres phénomènes dus au courant, car ils nous feront mieux comprendre les propriétés spéciales aux corps mauvais conducteurs.

CHAPITRE IX

DES COURANTS INDUITS.

Découverte de Faraday.

La découverte des courants induits est une des plus belles et des plus fécondes de celles qui ont illustré le nom de Faraday. Cette découverte, dans son histoire, a quelque analogie avec celle d'Œrsted. En effet, c'est en cherchant si l'électricité statique agissait sur l'aiguille aimantée, que le savant danois reconnut les attractions électro-dynamiques, et de son côté Faraday trouva l'induction voltaïque instantanée pendant qu'il cherchait l'induction permanente.

Lois fondamentales. Première loi.

Ces lois fondamentales sont les suivantes :

1° Toutes les fois que l'on approche d'un circuit fermé un con-

ducteur traversé par un courant, il se produit aussitôt dans ce circuit un courant nommé courant induit, de sens contraire au courant inducteur qui parcourt le fil rhéophore ; le courant induit n'a qu'une durée très-courte. Quand on éloigne le courant inducteur, il se manifeste dans le circuit fermé un nouveau courant instantané, mais cette fois de même sens que le courant inducteur.

Au lieu d'approcher et d'éloigner l'un des deux circuits, on peut les laisser appliqués l'un sur l'autre et lancer subitement le courant dans l'un ou le supprimer. Les résultats sont les mêmes : il se manifeste un courant induit inverse, c'est-à-dire de sens contraire au courant inducteur, au moment de la clôture du courant de la pile, et un courant induit direct, c'est-à-dire de même sens que le courant inducteur, au moment où on supprime ce dernier. **Autre manière d'expérimenter.**

En opérant de cette manière, les choses se passent comme si le courant inducteur était éloigné ou rapproché d'une quantité infinie.

A ces lois relatives aux signes des courants induits se joignent les suivantes touchant leur intensité. **Deuxième loi.**

2° Le courant induit inverse et le courant direct sont égaux sous le rapport de la quantité électrique, mais leur durée et leur tension sont différentes : le courant direct est le plus intense. Cependant tous deux impriment à l'aiguille d'un galvanomètre ordinaire une égale déviation ; car l'amplitude de la déviation dépend du temps qu'emploie l'aiguille à se mettre en mouvement, et il arrive qu'une moindre force d'impulsion est compensée par une durée plus grande. Mais en faisant usage de galvanomètres délicats et de l'appareil nommé pont électrique[1], les

[1] Le pont électrique a été imaginé par Wheatstone pour comparer les résistances de deux conducteurs de l'électricité dans le cas où la différence est trop faible pour être appréciée à l'aide du rhéostat. Il se compose (fig. 40) d'une planchette sur laquelle est fixé un fil contourné en losange ACBD, et présentant en ef et en gh une interruption. Aux sommets du losange et aux extrémités e, f, g, h, se trouvent des vis de pression. Les vis A, B sont destinées à recevoir les rhéophores d'une pile, les deux autres C, D à saisir les extrémités du fil d'un galvanomètre. Par cette disposition, supposant les communications établies en ef et gh, de chaque pôle de la pile partent

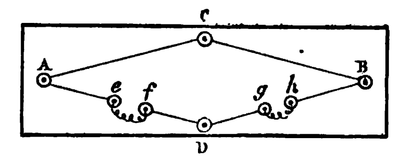


Fig. 40.

déviations produites par les deux courants induits sont différentes.

Résultats de Hipp.

Hipp a trouvé que la force du courant de fermeture du circuit était à celle d'ouverture comme 1 : 6, et les durées de ces deux courants évaluées en unités de temps étaient respectivement $0^s,0114$ et $0^s,0042$. En outre, la tension du courant d'ouverture est la plus grande, puisque, lancé dans le fil télégraphique, il transmet une dépêche à une distance de 250 lieues, tandis que l'autre courant franchit seulement une longueur de 20 lieues[1].

Résultats de Blaserna.

Les lois de l'induction établies par Faraday ont été dernièrement étudiées par M. Blaserna, surtout par rapport à l'intensité des phases initiales et finales de leur durée.

Il a trouvé les résultats suivants[2] :

a. Que le courant induit ne se forme pas instantanément, mais qu'il se passe un certain temps avant que le courant induit se manifeste. Ce temps dépend de la distance des spirales, et du milieu interposé : avec l'air la vitesse est de 153 mètres par seconde ; avec le soufre et le verre, elle varie de 45 à 54 mètres seulement.

b. Ce retard est plus grand pour les courants de clôture que pour celui d'ouverture, et dépend essentiellement des distances des spirales et de la nature du milieu interposé.

c. Le courant induit augmente rapidement d'intensité, arrive à un maximum et diminue plus lentement, en s'approchant au zéro par une courbe asymptotique.

d. Le courant d'ouverture accomplit ces phases dans un temps beaucoup plus court que celui de clôture, mais les aires qui représentent ces courants (en prenant le temps pour abscisse et les in-

deux fils qui se rendent, le premier à une extrémité du fil du galvanomètre, le second à l'autre extrémité. Si les quatre fils sont de longueur et d'épaisseur égales et de la même substance, il s'établit un équilibre parfait, de sorte qu'une source électrique, quelque puissante qu'elle soit, ne produit pas la moindre variation sur l'aiguille d'un galvanomètre. Mais quand, à l'aide des deux vis de pression *e* et *f*, on intercale dans le trajet du courant ACDB la résistance qu'on se propose de mesurer, et que, sur le trajet ADCB, on place en *gh* la résistance unité, l'équilibre du galvanomètre est troublé, et, suivant le sens du courant qui est prépondérant, on reconnaît si la résistance *ef* l'emporte sur celle en *gh* ou lui est inférieure. Par suite, on peut établir l'égalité entre ces deux résistances et en conclure la mesure de celle introduite en *ef*. (Voy. *Annales de chimie et de physique*, 3e série. t. X, p. 265.)

(*Note du traducteur.*)

[1] Bibl. univ., *Arch. des sciences naturelles*, 1859, vol. IV, p. 350.

[2] Blaserna, *Sulla durata e lo suiluppo delle correnti di induzione e le contra-correnti.* — Palermo, 1870.

tensités pour ordonnées) étant égales, il s'ensuit que l'intensité maximum de celle d'ouverture est plus forte que celle de clôture.

e. Avec les spirales employées par l'auteur, l'ensemble des phénomènes se produit dans 15 à 20 dix-millièmes de seconde pour le courant de clôture, et de 10 à 12 pour celui d'ouverture.

Telles sont les règles trouvées par ce savant; elles expliquent plusieurs phénomènes connus depuis longtemps.

Ainsi l'inégale intensité des deux courants induits nous explique pourquoi, lorsqu'une aiguille d'acier est aimantée par le courant induit la distribution de ses pôles est celle qui convient au courant de clôture. Explication d'anciennes observations.

De même dans la machine de Rhumkorff, des deux sortes de courants induits ceux qui se forment quand le circuit induit est interrompu sont les plus forts et sont les seuls qui peuvent passer et déterminer la tension des pôles.

3° L'action inductrice entre deux éléments varie en raison inverse de la simple distance, dans le cas où les conducteurs sont séparés par un milieu isolant ; mais si ce milieu est conducteur, l'intensité de l'induction s'affaiblit rapidement à cause des phénomènes d'influence qui se développent dans la masse interposée. Or, comme il n'y a pas de corps qui conduisent parfaitement ou qui isolent parfaitement, l'effet produit dépend beaucoup plus de la nature et de l'épaisseur du milieu que de la distance qui sépare les conducteurs. Troisième loi.

4° Lorsqu'on soumet à l'induction une hélice à spires nombreuses, chacune des circonvolutions contribue par son courant élémentaire à la somme des impulsions finales qui compose le courant induit, et l'intensité est proportionnelle au nombre des tours. La raison du fait est évidente; il résulte de ce que chaque tour suivant doit se charger d'électricité aux dépens du tour précédent. Quatrième loi

De cette manière on arrive à rendre l'induction assez puissante pour obtenir, non-seulement un courant mais une tension électrique très-forte. Il suffit pour cela d'employer des machines d'induction à long fil, telles qu'on les construit maintenant; ces appareils peuvent remplacer les anciennes machines électriques à plateau et transforment réellement l'électricité dynamique en électricité statique.

Cinquième loi. Induction successive.

5° De même que le courant volta-électrique, les courants induits peuvent, par leur influence sur des circuits fermés, donner naissance à de nouveaux courants induits, puis ceux-ci à d'autres, et ainsi de suite, de manière à produire des courants induits de divers ordres. Or, chacun de ces courants produisant deux courants, au moment où il commence et à l'instant où il finit, les phénomènes se compliquent et les courants s'affaiblissent à mesure qu'ils sont d'un ordre plus élevé. Ces phénomènes prouvent qu'au moment de la clôture ou ouverture du circuit, tout le milieu environnant se trouve ébranlé, mais que la vitesse avec laquelle cet ébranlement se propage est dépendante de la nature du milieu, et que les molécules pondérables y jouent une partie principale : mais quant à la connaissance de la cause qui produit ces oscillations, on ne peut l'avoir qu'en étudiant une autre classe de phénomènes qui s'accomplissent dans le conducteur lui-même, et qui sont connus sous le nom d'*extra-courant*. Ces phénomènes sont étroitement liés à l'état initial du courant dans ce conducteur dont nous avons parlé dans le chapitre précédent et ont été aussi étudiés par M. Blaserna.

Sixième loi. Extra-courant.

6° Au moment soit de la clôture, soit de l'ouverture du circuit, il se produit une modification très-importante dans le fil conducteur : le courant se renforce considérablement au moment de l'ouverture, et pour peu que le fil soit long et roulé en hélice, on a des étincelles et des secousses violentes. Nous avions comparé ce courant à celui du *coup de bélier* dans les tubes, et nous avions même prévu qu'une modification contraire devait se trouver au moment de l'ouverture. Or M. Blaserna vient de vérifier cette seconde particularité.

a. Au moment de la clôture du circuit, le courant subit une diminution notable d'intensité et descend considérablement *au-dessous* du niveau qu'il gardera après.

b. Au moment de l'ouverture, au contraire, le niveau du courant monte considérablement *au-dessus*.

c. Ces phases de minimum et maximum absolus, sont suivies d'une série d'oscillations décroissant rapidement et tout se trouve réduit à l'état normal dans un temps qui est à peu près 12 millièmes de seconde.

Ces résultats quoique sans doute incomplets à cause de la difficulté d'exécution des expériences, sont très-intéressants et nous éclairent sur la nature du mouvement électrique. Mais avant d'entreprendre le parallèle de ces mouvements avec ceux des fluides ordinaires, achevons d'exposer ce qui regarde les lois de l'induction.

Septième loi. Induction par les aimants.

7° Les aimants, eux aussi, sont capables d'induire les circuits fermés ; ils se comportent en tout point comme les systèmes de courants, nommés solénoïdes par Ampère. Bien plus, les courants magnétiques des forts aimants étant très-énergiques, ils développent des effets intenses, si bien que, au point de vue pratique, il y a avantage à remplacer l'induction volta-électrique par la magnéto-électrique ou tout au moins à combiner l'influence inductrice d'un aimant ou d'un électro-aimant avec celle d'un courant voltaïque. En approchant et éloignant tour à tour un aimant énergique d'un circuit métallique fermé, ou encore en aimantant et désaimantant successivement un noyau de fer placé au centre d'une hélice conductrice, et d'une manière générale en troublant par un procédé quelconque l'état magnétique de substances aimantées il est facile d'obtenir des courants assez énergiques pour donner des manifestations calorifiques et lumineuses dont les lois sont les mêmes que celles des effets analogues produits par les courants voltaïques.

Induction tellurique.

La terre même agissant comme un véritable aimant, donne aussi naissance à des courants d'induction et lorsqu'on recourt à des dispositions convenables ils acquièrent une intensité telle qu'ils produisent des étincelles et des décompositions chimiques. Par conséquent une quantité considérable d'électricité se développe au sein de toutes les grandes masses métalliques animées de mouvement, et si ce n'était la facilité avec laquelle cette électricité est ramenée à l'état neutre, nous serions incessamment exposés à être foudroyés (Faraday).

Magnétisme de rotation.

8° Arago a découvert que les corps conducteurs en mouvement tendent à entraîner les aimants placés à une petite distance de leur surface ; les phénomènes de ce genre, connus sous le nom de magnétisme de rotation, sont causés par des courants induits, développés dans les corps conducteurs des courants dont on a pu constater l'existence à l'aide de procédés rhéométriques.

· Tels sont les faits principaux qui constituent toute une vaste branche des sciences physiques ; il nous reste maintenant à chercher comment, au point de vue mécanique, nous pouvons expliquer ces phénomènes. Et pour arriver à ce résultat, il ne faut pas s'astreindre à étudier les phénomènes dans l'ordre qui vient d'être indiqué ; mais il convient de procéder suivant l'ordre le plus favorable à notre sujet.

Parallèle de ces faits avec les phénomènes hydrauliques.

Ces phénomènes sont analogues aux résultats obtenus dans une série d'expériences d'hydraulique sur lesquels nous nous arrêterons un instant.

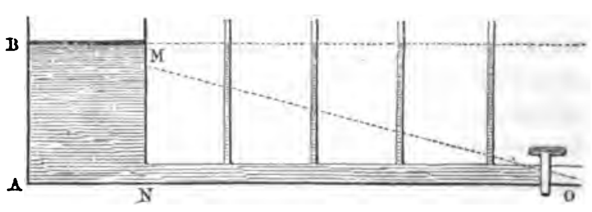
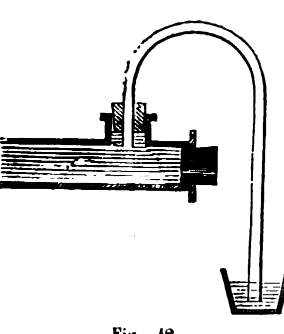


Fig. 41.

Soit (fig. 41) un récipient, AB, rempli d'eau et à niveau maintenu constant ; mis en communication avec un tuyau horizontal, N O, muni d'un robinet en O et sur la longueur duquel sont adaptés plusieurs petits tubes verticaux en verre, appelés piézomètres.

Phénomènes d'ouverture des tubes.

Lorsque l'orifice O est fermé à l'intérieur des piézomètres, l'eau se tient à la même hauteur que dans le réservoir ; vient-on à ouvrir le robinet O, on voit : 1° dans tous les piézomètres se manifester très-rapidement un abaissement du niveau lequel descend de beaucoup au-dessous de celui qu'il occupera pendant l'écoulement continu du liquide. Si le fluide s'écoule avec une vitesse suffisante, il se produit une série d'oscillations dans les tubes qui s'éteignent seulement après quelque temps. Si ce tube est assez large à l'orifice et fermé par un simple tampon, en retirant celui-ci


Fig. 42.

on peut avoir dans ce dernier tube près de l'orifice une absorption que l'on rendra évidente en employant un piézomètre (fig. 42) replié en bas en forme d'U renversé, et plongeant dans un verre contenant un liquide coloré.

2° Le courant étant établi d'une manière permanente, les surfaces liquides libres dans les divers piézomètres sont situées sur une ligne droite, MO, inclinée par rapport à l'horizon, et qui rencontre ce vase en un point M au-dessous du niveau du réservoir.

Phénomènes de fermeture de tubes.

3° Au moment où l'on ferme l'orifice O, dans tous les tubes indicateurs, le niveau du liquide s'élève subitement à une hauteur notablement supérieure à l'horizontale qui correspondait à l'état d'équilibre de la masse fluide ; puis après une série d'oscillations il revient occuper sa position primitive sur cette horizontale. Ces phénomènes sont trop ressemblants à ceux qu'on trouve dans l'extra-courant pour avoir besoin d'explication.

Application à l'électricité.

Le premier fait constitue, pour ainsi dire, un coup de bélier négatif, rappelant assez bien le courant d'induction de fermeture du circuit électrique : seulement, ici il faut faire attention à ce que l'ouverture du tube équivaut à la fermeture du courant, et la fermeture du tube équivaut à ce que l'on nomme en électricité ouverture du circuit électrique. La disposition uniforme des niveaux dans la seconde partie de l'expérience a pour homologue la loi de Ohm appliquée au cas d'un conducteur indéfini se déchargeant dans le sol par une de ses extrémités, tandis qu'à l'autre il est en communication permanente avec une pile. Enfin la dernière phase de l'expérience est exactement comparable au contre-coup qui produit le courant induit d'ouverture. Les phénomènes oscillatoires de l'état variable du courant électrique sont parfaitement semblables à ceux qu'on observe dans les liquides ; et comme nous disions tout à l'heure, nous les avions prévus avant même que M. Blaserna les eût mis en évidence avec ses instruments délicats[1].

Mais il y a encore des phénomènes qui sont permanents et qui sont très-intéressants, car ils ont leur parallèle aussi dans l'électricité.

Autres phénomènes.

Supposons un récipient MN, portant adapté à son fond un tube

[1] Voy. les *Atti dell' Ac. de N. Lincei*, t. XVII, 3 aprile 1864.

de caoutchouc KO, parfaitement cylindrique ; lorsqu'on laisse le liquide s'écouler, ce conduit change de forme et sa section, de circulaire qu'elle était primitivement, s'allonge et prend la figure d'une boutonnière, à peu près comme il est représenté en R (fig. 43). La section devient alors notablement plus petite, particularité que l'on peut mettre en évidence à l'aide du dispositif suivant : On enferme le tube KO dans un cylindre de métal ou de verre AB, dont il occupe l'axe, ce cylindre porte vers sa partie supérieure un ajutage recourbé C plongeant dans l'eau d'une capsule D, le tube métallique AB est rempli d'eau.

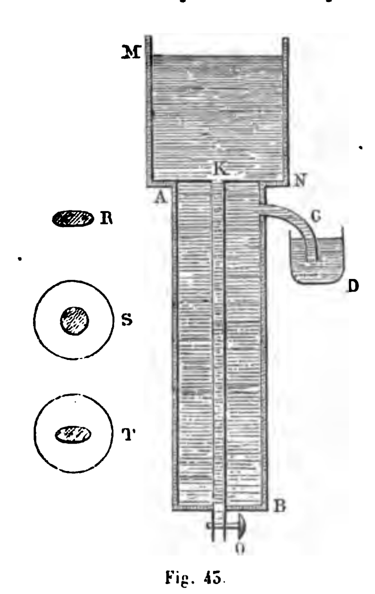


Fig. 43.

Diminution de pression dans les conduites.

Au moment où on ouvre le robinet O, une partie de l'eau contenue en D passe brusquement dans l'ajutage C. Au contraire, lorsqu'on ferme l'orifice O, il se produit un refoulement par le tube C et la quantité d'eau du vase D augmente. Ces résultats sont évidemment dus à la diminution de pression qui a lieu au moment de l'écoulement dans tout conduit traversé par un fluide. La cavité du tube extérieur AB, qui d'abord était annulaire comme elle est figurée en S, se transforme en une autre T dont l'aire est plus grande, puisque la section du tube flexible a diminué d'étendue.

Appliquons ces données au cas de l'électricité.

Si le courant électrique est un flux d'éther ou de toute autre matière, il est manifeste qu'au moment où un courant envahit un conducteur, le milieu ambiant éprouvera une modification dans son état de pression, lequel provoque un mouvement d'éther jusqu'à ce qu'un nouveau régime soit rétabli, ce qui arrive après un temps très-court. L'équilibre nouveau ainsi constitué persistera autant que le courant. Au moment où ce dernier cesse, il y aura reflux, afin que le milieu revienne à sa première condition.

Notre théorie est générale et se prête facilement à de nombreuses déductions, aussi allons-nous l'appliquer aux divers cas particuliers de l'induction.

Le courant induit, avons-nous dit, apparaît seulement à l'instant de la clôture ou de la rupture du courant inducteur, tandis que toute manifestation cesse dans le fil induit pendant que le circuit inducteur reste fermé. Un tel phénomène nous prouve que, dans les corps disposés autour d'un fil traversé par le courant, l'éther est dans un état d'équilibre différent de celui qui lui appartenait avant la mise en circulation du flux électrique. Ce changement d'équilibre devient manifeste à l'instant où se constitue un nouvel état de choses, mais il ne peut durer pendant tout le passage du flux électrique, parce qu'un équilibre nouveau s'établit promptement au sein des corps isolants qui séparent les conducteurs et réagit sur ces derniers. Tant que dure la circonstance modificatrice, il ne se manifeste rien, mais lorsqu'on rompra le circuit, l'état des choses redeviendra ce qu'il était primitivement, et l'équilibre de l'éther encore une fois sera troublé. De là l'influence de l'extra-courant, sur le courant d'induction signalée par M. Blazerna, et la production des phases oscillatoires que l'observation a révélées. Application de ce principe au courant électrique.

Cette rupture d'équilibre de l'éther produite par l'influence des courants, est analogue à celle que nous observons dans certaines expériences faites avec l'électricité de tension. Si, par exemple, un galvanomètre sensible communique avec une sphère métallique isolée, chaque fois que l'on approchera de cette sphère un conducteur chargé d'électricité, le rhéomètre accusera le développement d'un courant de la sphère vers le sol, et si on décharge le conducteur l'aiguille indiquera un courant du sol vers le fil. Ces observations nous préparent à comprendre en quoi consiste l'état électrique des corps qui a été nommé état de tension et à reconnaître la relation qui existe entre les effets de tension et ceux dus au courant. Ainsi l'induction doit être regardée comme le trait d'union qui relie les phénomènes d'électricité statique à ceux de l'électro-dynamie. Importance de l'induction.

En cherchant à expliquer les faits précédents, nous trouverons des données utiles pour éclairer le difficile problème des actions à distance, car l'induction dynamique électrique est, à vraiment

parler, un exemple d'action à distance puisqu'elle s'exerce à travers le vide et les corps mauvais conducteurs et qu'elle présente toutes les particularités des forces dites actions à distance. Mais avant d'entrer plus avant dans la théorie de l'induction, il est bon de faire remarquer que les phénomènes d'influence, dont nous avons rappelé les lois, présentent une grande complexité et ne sont pas tous de la même espèce.

Deux classes de faits d'induction.

Les phénomènes d'induction se partagent tout naturellement en deux classes : les uns se produisent au sein du conducteur traversé par le courant inducteur, et les autres se manifestent entre circuits plus ou moins rapprochés. Dans le premier cas on dit qu'il y a induction d'un courant sur lui-même. Le mot induction intérieure, à notre avis, serait meilleur. Nous commencerons l'analyse de la question par l'étude de cette induction intérieure, car c'est elle qui nous fera comprendre comment les choses se passent dans le cas d'induction extérieure.

Nous avons déjà mentionné qu'à l'instant où on interrompt brusquement le courant dans un rhéophore, on observe un renforcement de courant qui se traduit par une forte tension. (Voy. plus haut 6°). Ce phénomène est en tout comparable à celui que nous avons vu plus haut se développer dans un tube parcouru par un courant d'eau lorsqu'on vient à fermer brusquement l'orifice de sortie. A ce moment se produit ce que l'on a nommé un coup de bélier, c'est-à-dire un choc contre les parois latérales et contre la clef du robinet servant à interrompre le cours du fluide. Cette force vive peut même être utilisée. En effet si, adoptant une disposition signalée dans une expérience précédente, le tuyau de conduite communique avec un tube latéral, aussitôt que l'on arrête l'écoulement dans le tube principal l'eau jaillit dans la branche latérale à une hauteur assez grande et sensiblement proportionnelle à la vitesse du courant. C'est là le principe du bélier hydraulique de Montgolfier. Le phénomène que nous examinons est dû à l'inertie et à la vitesse de la masse mise en mouvement dans le tube ; autrement dit, c'est la force vive emmagasinée dans cette masse qui entraîne une portion du fluide au-dessus du niveau du réservoir. Le coup de bélier s'observe également lorsqu'on interrompt un courant gazeux et il doit être compté parmi

Coup de bélier du courant.

les faits fondamentaux de l'hydro-dynamique[1]. Par conséquent nous devons le retrouver en étudiant l'électricité, car, suivant la remarque de L. Clark, s'il nous était possible de priver l'eau de sa pondérabilité et l'air de son élasticité, les lois du mouvement de ces fluides deviendraient celles de l'électricité[2]. Par conséquent, lorsqu'une masse électrique est en mouvement dans un conducteur, au moment où l'on ouvre subitement le circuit, il se produit un coup de bélier qui se manifeste par l'étincelle de rupture et par l'extra-courant.

Origine de la tension électrique.

Le coup de bélier explique comment, dans un fil qui tend à se décharger, le courant présente vers les extrémités une tension statique dépassant de beaucoup celle ordinaire de la pile et proportionnelle à la longueur du fil lui-même. Ce fait a une assez grande importance, car il montre que les tensions statiques sont dues à une accumulation de fluide et à une véritable pression exercée par la masse d'électricité condensée dans le rhéophore. En résumé, l'induction d'un courant sur lui-même est un simple phénomène mécanique dû à ce que l'éther qui circule dans le fil possédant une certaine force vive, le flux ne peut perdre instantanément la vitesse dont il est animé et donne un coup de bélier, et de là surgit une tension.

Réaction du coup de bélier.

Le coup de bélier qui se manifeste dans un circuit au moment de la rupture d'un courant (l'extra-courant des physiciens), influence indirectement l'action inductrice extérieure de ce circuit; il renforce le courant inducteur et les choses se passent

[1] Les gaz permettent de faire une jolie expérience sur le sujet qui nous occupe ici. Un courant de gaz d'éclairage est introduit dans un tube en caoutchouc MN, muni de deux tubes latéraux PB et NA, terminés par des becs, à l'extrémité desquels on peut allumer le jet gazeux. Le tout repose sur une table horizontale. On donne un coup de poing sur le tube PB de manière à interrompre le courant de gaz; aussitôt en NA la flamme s'allonge et reçoit un ébranlement tellement vif, qu'elle s'éteint. Semblable chose se passe lorsque le système de tubes est traversé par un courant d'eau. En effet, vient-on à arrêter brusquement le cours du liquide en B, il se fait aussitôt un jet au point A.

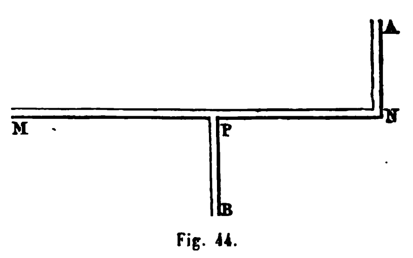


Fig. 44.

[2] *Report of the comittee*, etc., p. 294.

comme si le courant excitateur était plus intense qu'il ne l'est réellement ; par conséquent il n'y a rien d'étonnant à ce que dans un arc rhéophore donné, le courant induit soit très-puissant. Au contraire, à l'instant de la clôture, il est moins énergique, car ce courant est produit exclusivement par l'aspiration latérale du fluide électrique due à la diminution de pression qui surgit dans le rhéophore au commencement du courant. Il y a donc un vide partiel à remplir avec une certaine masse : et nous en verrons bientôt les effets. Lorsqu'on ouvre le circuit, la masse du courant se trouve arrêtée tout d'un coup, pendant qu'elle est encore animée de vitesse. Toutefois, comme le phénomène dit coup de bélier ne change en rien la masse d'électricité en mouvement, les intensités absolues des courants mesurées au galvanomètre, c'est-à-dire les quantités de fluide qui passent pendant la déviation de l'aiguille, sont identiques pour les deux courants. Mais les effets de tension étant inversement proportionnels aux temps nécessaires à leur manifestation sont assez différents, malgré que les résultats fournis par les galvanomètres conservent sensiblement la même valeur.

Théorie mécanique de l'induction.

Examinons maintenant l'induction extérieure :

On peut donner de l'induction à distance ; une théorie tout entière fondée sur un principe d'hydro-dynamique découvert jadis par Venturi. Tout liquide en mouvement dans un conduit exerce contre les parois une pression différente de celle qu'il produit à l'état statique. Il presse d'autant moins que sa vitesse est plus grande. Lorsque la vitesse dépasse une certaine valeur, la pression devient négative, c'est-à-dire qu'il n'y a plus de pression proprement dite, mais un effort d'aspiration vers l'axe du tube ; en d'autres termes, les parois du tube seraient tirées de dehors en dedans si elles étaient flexibles et si le liquide ne pouvait s'en séparer ; on dit alors qu'il y a succion. Venturi a donné le nom de *communication latérale du mouvement* à ces phénomènes. Parmi ceux-ci il y a les phénomènes de succion qui ont été utilisés pour la construction de l'injecteur Giffard et dans celle de certaines machines soufflantes employées dans les forges.

[1] Venturi, *Sur la communication du mouvement latéral des fluides* Paris, 1806.

L'ouvrage de Venturi renferme des exemples nombreux de communication du *mouvement latéral* des fluides. Il cite les remous des fleuves, l'aspiration des tourbillons au voisinage des orifices, la transmission du mouvement vibratoire dans les tuyaux d'orgue, etc., faits que pour la plupart la théorie hydro-dynamique généralement acceptée encore aujourd'hui n'explique pas, et nous ne devons pas en être surpris, car les équations du mouvement des fluides sur laquelle elle repose, ont été fondées sur le principe de l'égalité de pression dans tous les sens, lequel malheureusement ne s'applique pas au cas des fluides qui de l'équilibre passent au mouvement. A la vérité, Poisson a essayé d'établir ces équations en suivant une méthode plus générale, mais il a rencontré des difficultés d'analyse telles que ces formules sont loin de convenir à tous les cas[1]. Lui-même, dans son traité de mécanique, donne les équations du mouvement des fluides en les déduisant du principe hydrostatique de l'égalité des pressions, étendu au cas des fluides en mouvement; mais il avoue l'insuffisance de ce principe et reconnaît que plusieurs phénomènes des fluides animés de mouvement doivent s'expliquer par une inégalité de pression dans les divers sens[2]. Ainsi le calcul laisse trop à désirer sur la question présente pour que nous espérions en tirer une explication analytique des courants d'électricité. Nous sommes réduits à traiter le problème *a posteriori* et à baser nos raisonnements sur des analogies, méthode qui certainement ne satisfera pas tous les esprits.

Principe de Venturi.

Cette manière de procéder une fois acceptée, il nous semble très-rationnel de rapporter les phénomènes de l'induction à un affaiblissement des pressions latérales, lequel existe certainement si le courant est un flux de fluide éthéré ; or, d'après l'ensemble des faits exposés ci-dessus, ce point nous paraît acquis à la science. Nous aurons encore ici l'avantage de résoudre la grave difficulté, qu'aucune expérience décisive n'a tranchée jusqu'ici, de savoir si le courant est uniquement un flux d'éther ou bien s'il y a en même temps transport des molécules matérielles. Notre tentative est au moins bonne en cela, qu'établissant, un lien entre

L'induction réduite au principe de Venturi.

[1] Poisson, *Journal de l'École polytechnique*, cah. XX, t. II.
[2] Poisson, *Mécanique*, t. II, p. 665. Paris, 1833.

l'induction et les autres branches de la physique, elle fait cesser l'état d'isolement dans lequel se trouve un chapitre important de l'électricité.

Différence entre l'induction statique et la dynamique.

Les corps voisins du fil traversé par le courant sont ou conducteurs ou isolants ; dans ces deux cas, les effets diffèrent. Examinons d'abord le cas d'une substance isolante. Les notions acquises sur la manière d'agir de l'électricité nous prouvent que dans les mauvais conducteurs les mouvements de transport du flux électrique sont seulement possibles dans des limites très-étroites, que d'autre part ce flux rencontre les plus grandes difficultés à passer d'un isolant à un conducteur ; pour lui faire surmonter cette résistance, il est besoin d'une influence extérieure qui exagère sa tension. Si donc un fil est parcouru par un courant, la pression diminue au sein du rhéophore ; par suite, tout autour, une aspiration tend à se faire, en vertu de laquelle, dans les couches successives du milieu isolant circonvoisin, s'établit un afflux vers le fil, et, par conséquent, les couches les plus éloignées éprouvent une dilatation.

L'intervention de la matière pondérable est mise en pleine lumière par les expériences de M. Blaserna, qui apprenent en outre que la vitesse de cette transmission d'action est même très-faible. Il reste seulement à concevoir comment les choses se passent dans l'intérieur des corps.

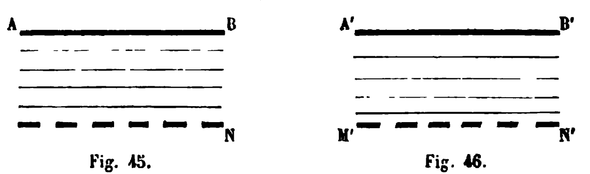


Fig. 45. Fig. 46.

Soit AB (fig. 45) le fil inducteur, et MN le fil induit, avant l'admission du courant dans AB, l'éther compris entre les deux conducteurs est distribué d'une manière uniforme, et nous pouvons représenter cet état par une suite de parallèles équidistantes. Mais lorsque le courant est établi dans A'B', la distribution de l'éther change ; le fluide est condensé dans les couches voisines de A'B' (fig. 46), et dilaté dans celles qui touchent à MN ; par conséquent, le conducteur M N subira un effet d'aspiration de la

part de la couche d'éther directement en contact avec lui ; et, si nous faisons abstraction du milieu interposé, nous pourrons envisager l'influence de A B sur M N comme une action immédiate.

Les personnes qui accepteraient difficilement ces effets de condensation et de dilatation de l'éther peuvent supposer que, la pression diminuant, les molécules sont susceptibles d'oscillations plus énergiques, et ainsi se trouve accrue leur action sur le milieu ambiant; dans l'une ou l'autre hypothèse, le résultat final demeure le même.

Avant d'examiner les phénomènes d'induction dans les fils conducteurs, il est nécessaire de rappeler ce qui a été dit relativement au mode de propagation du courant dans ces fils. L'établissement du courant n'y est pas instantané. Pour envahir un fil, le flux électrique emploie un temps déterminé, et il se transmet successivement d'une section à la suivante, si bien que l'état définitif est précédé d'un état variable ayant une durée plus ou moins longue, que l'on a trouvée en rapport avec l'intensité de l'induction dont les corps environnants sont susceptibles. Cela s'explique aisément : l'induction est un véritable travail et la force du courant n'est pas infinie ; donc l'effet se produit en un temps plus ou moins long, selon la masse mise en mouvement autour du conducteur.

Avertissement important

Propagation successive du courant.

La durée de l'établissement d'un flux électrique dans un fil, quoique fort petite, peut toujours par la pensée être divisée en intervalles moindres, pendant chacun desquels le front de l'onde électrique envahit une des tranches successives du fil conducteur, exerce en même temps son action sur le milieu ambiant et, par l'intermédiaire de celui-ci, sur un circuit placé à une certaine distance. Voyons donc comment une diminution de pression dans l'éther, qui enveloppe un circuit inducteur, peut développer un courant induit. Soit d'abord un cas simple et assez général pour résumer les autres; par exemple, celui de deux fils parallèles, dont l'un reçoit le courant inducteur, tandis que dans l'autre se développe le courant induit.

Soient AB (fig. 47) le fil inducteur, et MN le fil induit séparé du premier par une couche mince d'une substance inapte à livrer passage à l'électricité, mais dont le régime éthéré se modifie sous

Explication de l'induction à la cloture du circuit.

l'influence d'une variation de tension électrique. On peut représenter, par les ordonnées d'une ligne droite A'B', la tension naturelle du fil AB, et par celles d'une autre droite M'N', parallèle à MN, la quantité naturelle de l'éther à l'intérieur du fil MN avant l'introduction du courant dans AB. Aussitôt après la clôture du circuit AB, la pression diminue dans ce fil, de sorte que l'ordonnée AA' est réduite à la portion d'A'*a* seulement, et toute la diminution peut être figurée par l'aire de la courbe *abc* : aire courbe qui est proportionnelle aussi à l'intensité du courant dans les différentes sections. La conservation de l'équilibre exige qu'aussitôt que la pression se trouve affaiblie dans le conducteur, il se fasse dans l'espace environnant un appel d'électricité vers le fil.

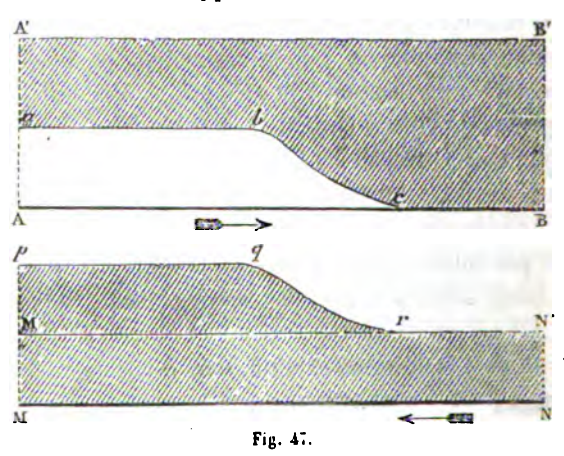


Fig. 47.

A ce même moment dans le circuit MN le tronçon M'*r*, recevant par l'intermédiaire du milieu ambiant l'influence de la diminution de pression survenue dans AB l'éther se précipite vers ce vide imparfait pour établir la compensation; et, comme il ne peut affluer des parties M'*r* sans qu'il survienne en ces points un affaiblissement de la pression encore plus fort, il doit arriver de la partie N'*r* non encore envahie par le courant. Donc, dans le fil induit MN, il se produit un courant de N vers M en sens contraire du courant inducteur, et la charge du fil peut être représentée par M*pqr*. Si, comme cela se passe généralement dans la pratique, MN est un circuit fermé par un galvanomètre, l'aiguille

de l'appareil indique, par sa déviation, que le courant marche constamment de N vers M, et jamais en sens inverse, car la portion *Mr*, étant déjà équilibrée par l'influence du tronc précédent, ne saurait contribuer à fournir du fluide à la section contiguë sans détruire son propre équilibre. La quantité absolue d'éther qui existe dans le fil pendant le passage du courant doit subir une augmentation, mais sa tension ne sera pas sensible, parce qu'en réalité il ne fait que rétablir l'équilibre troublé par la diminution de pression survenue en AB, et lorsque MN est amené à une charge suffisante pour l'équilibre, le mouvement électrique s'arrête dans le fil.

Donc, aussitôt après la cessation de l'état initial du courant dans AB, le conducteur induit paraît constitué à l'état naturel, de telle sorte qu'il n'y a aucun courant permanent, mais seulement un courant transitoire, de telle sorte que la charge absolue soit augmentée.

Examinons maintenant le cas de l'induction finissante, c'est-à-dire celle qui se manifeste à l'ouverture du circuit. Induction à l'ouverture du circuit.

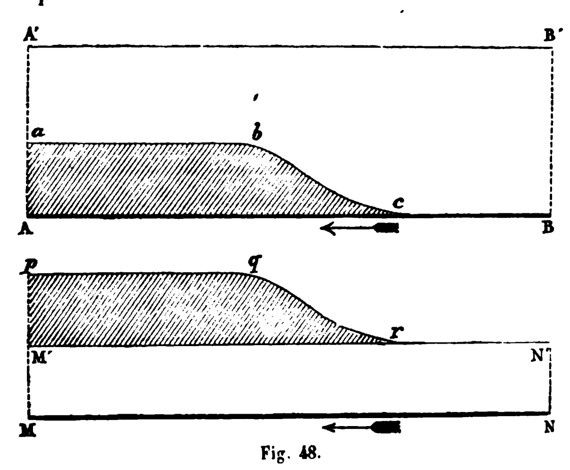


Fig. 48.

Les ordonnées (fig. 48) de la ligne A'B' parallèle à AB représentent comme ci-dessus la charge naturelle de l'éther dans le fil à la pression ordinaire, c'est-à-dire en l'absence de tout courant. Mais comme pendant le flux du courant cette pression diminue, à ce moment elle ne sera exprimée que par la hauteur A'*a*B'. A un

certain temps après l'interruption du courant, la partie droite bc est revenue à l'état naturel, et la gauche *ab* ne l'est pas encore. L'espace $Aabc$ représente le vide dans la portion correspondante, pendant que le front d'arrière de l'onde électrique marche suivant la flèche. Dans cet état de choses, il est évident que le conducteur voisin NM sera ramené à sa pression naturelle NN' dans la partie $N'r$ et aura une charge $M'pqr$ dans l'autre partie $M'r$. Le front pqr du courant suivra la marche de *abc*, et dans le fil MN le courant sera de même sens que celui du courant inducteur, car le fluide électrique s'écoulera toujours du côté où la diminution de pression subsiste encore; donc il se fera un courant induit direct. Ce courant, de même que le premier, est très-court et on le nomme communément *instantané*, parce que dans une section donnée, l'équilibre se rétablit aussitôt par l'effet des autres parties du circuit. Si lors de la rupture du courant inducteur, le circuit induit est ouvert, il se manifeste une accumulation sensible d'électricité dans le sens de l'onde inductrice, c'est-à-dire du côté de M, et par suite une tension vers cette extrémité, et une étincelle de décharge.

Extension aux phénomènes accessoires.

Les phénomènes fondamentaux de l'induction se trouvent ainsi expliqués, mais il est un grand nombre de faits secondaires qui découlent de notre principe fondamental comme autant de corollaires, et dont la discussion sera le complément naturel de notre théorie; ne pouvant entrer dans tous les détails, nous nous bornerons à indiquer les points principaux.

Tension plus grande du courant d'ouverture.

1° Rappelons ce qui a été dit plus haut, relativement à la différence de tension des deux courants induits de clôture et d'ouverture. On saisit maintenant pourquoi le courant d'ouverture est le plus intense; en effet, à ce moment, la charge électrique du fil se porte tout entière et se concentre à une extrémité; de plus, elle est renforcée par *le coup de bélier* du courant principal, auquel il faut encore ajouter un effet du même genre dû au courant induit qui ne peut perdre instantanément la vitesse dont il est animé. Toutes ces causes contribuent beaucoup à la décharge avec étincelle.

2° On peut comparer les courants induits à de grandes vagues électriques accourant pour compenser la diminution de pression

survenue dans les conducteurs voisins, et aussitôt que l'équilibre se trouve établi, la pression redevient ce qu'elle était primitivement.

3° Quand on place une lame conductrice entre les deux spirales d'une bobine d'induction, les effets diminuent d'une manière notable, et la lame métallique fournit directement des courants induits ; il résulte de là que l'influence inductrice s'exerce simultanément sur toute la masse ambiante, et que l'induction étant une action de transport et non de radiation, son intensité ne décroît pas avec le carré de la distance, mais diminue en raison de la masse qui, interposée entre les conducteurs, concourt à rétablir l'équilibre de pression.

Disposition hélicoïdale.

4° Dans une hélice, la disposition du fil est telle, que chaque spire emprunte pour ainsi dire le fluide à la suivante, et celle-ci aux autres ; par conséquent, plus le nombre des tours sera grand, plus grande aussi sera la différence de pression de l'électricité mise en mouvement. Au contraire, dans un conducteur massif, l'afflux électrique se fait d'un seul coup. Il est donc facile de s'expliquer pourquoi la forme hélicoïde du circuit est la plus avantageuse à donner, non-seulement au fil induit, mais encore au fil inducteur, dont l'extracourant est ainsi notablement renforcé. La décharge d'une bobine formée par plusieurs couches ne peut être instantanée ; elle est, au contraire, multiple, et les diverses couches réagissant les unes sur les autres, il se produit une sorte d'ondulation rhythmée. En effet, les expériences de Gassiot, sur les appareils d'induction, ont montré que, lors de l'ouverture ou de la fermeture instantanée du circuit, la lumière obtenue dans un milieu raréfié, est constamment stratifiée.

Influence du condensateur.

De plus il n'est pas indifférent de donner telle ou telle longueur relative aux hélices induites et inductrices; aussi, dans les machines d'induction, les conditions expérimentales sont-elles fort compliquées, d'autant plus qu'il faut tenir compte de l'influence due à l'état magnétique des pièces de l'appareil et à la charge statique qui se fait dans l'enveloppe isolante des fils, comme l'a constaté M. Rhumkorff. Dans les machines d'induction ordinaires, l'extracourant du coup du bélier est étouffé par un condensateur qui en absorbe la décharge, et on l'empêche ainsi de rebrousser chemin

dans le fil inducteur et de paralyser l'influence déjà produite sur le fil induit. Au lieu d'étouffer l'extra-courant à l'aide d'un condensateur faisant l'office d'un vaste réservoir, on arrive au même résultat en l'employant à produire un travail quelconque assez énergique pour en absorber toute la force vive. Mais nous ne devons pas, dans cet ouvrage, nous arrêter davantage sur toutes les questions secondaires; il nous suffit d'expliquer les phénomènes fondamentaux.

Influence de l'enveloppe isolante.

5° Nous venons de dire que la couche isolante qui sépare les fils induits a une grande influence. Elle subit aussi l'induction et augmente la capacité et la tension du conducteur principal. Ainsi, dans les grandes bobines, la décharge du fil induit ne se fait pas à toutes les interruptions du circuit principal direct, mais à des intervalles assez distants et discontinus, pendant lesquels le courant atteint une tension très-considérable capable de donner en éclatant des effets foudroyants qui sont hors de proportion avec ce qu'on obtiendrait sans l'enveloppe isolante.

Induction par les aimants.

Les aimants ont été assimilés par Ampère à des solénoïdes, et théoriquement ils peuvent être considérés comme des systèmes de courants, bien que l'on n'ait pas encore réussi à tirer directement un courant de la substance d'un aimant. Or les propriétés inductricesdes aimants mettent hors de doute l'exactitude de la théorie d'Ampère et nous montrent que si un aimant employé seul ne nous donne pas un flux électrique, cela tient à l'impossibilité dans laquelle nous sommes d'ouvrir et de fermer ses circuits moléculaires, et de les mettre en rapport avec un galvanomètre. L'effet que l'aimant ne peut réaliser seul, il le produit d'une façon indirecte en troublant l'équilibre de l'éther des corps circonvoisins. Les propriétés caractéristiques de ce genre d'action seront signalées plus loin (chap. XIII); qu'il suffise pour le moment de rappeler que l'induction magnéto-électrique nous donne le moyen de transformer la puissance magnétique en chaleur, par l'intermédiaire d'une action mécanique.

Magnétisme de rotation d'Arago.

Arago a reconnu (n° 7 de ce chap.) que si une aiguille aimantée oscille au-dessus d'une plaque de cuivre, l'amplitude des oscillations diminue avec rapidité et l'aiguille s'arrête promptement; il découvrit, en outre, que réciproquement un disque de cuivre M

(fig. 49), mis en rotation à l'aide d'une corde sans fin AB au-dessous d'une aiguille aimantée *ab*, l'entraîne dans le sens de son mouvement.



Fig. 49.

Ces effets sont dus à des courants induits développés dans l'intérieur de la lame métallique. Or, à l'exemple de Joule et de Foucault, on peut renverser l'expérience et faire tourner un disque de cuivre entre les pôles d'un aimant puissant, ou d'un fort électro-aimant. Alors il se développe des courants induits au sein de la masse métallique, et ceux-ci réagissant sur les molécules matérielles, les mettent en vibration, d'où l'élévation de température très-notable du métal durant cette expérience déjà citée dans un des premiers chapitres de cet ouvrage. Le dégagement de chaleur a lieu aux dépens de la force mécanique employée à mettre le disque en rotation. En effet, quand l'électro-aimant de l'appareil de Foucault n'est pas traversé par un courant, la force nécessaire pour faire tourner la lame de cuivre est très-faible; mais vient-on à lancer dans le fil de l'électro-aimant le courant d'une pile de six couples, un seul homme, agissant sur la manivelle de l'instrument, ne parvient pas à déplacer un disque dont le diamètre a quelques centimètres de longueur; ce disque semble immobilisé par un frein invisible, tant est grande la résistance au mouvement. Dans cette curieuse expérience, on voit le travail mécanique se transformer en chaleur, le courant électrique agissant comme intermédiaire. On peut arriver

Expérience de Foucaul

à la même démonstration d'une manière encore plus saisissante :

Expérience du cube de cuivre.

un petit cube en cuivre *m* (fig. 50) est suspendu entre les pôles d'un puissant électro-aimant S, à l'aide d'un cordon de soie tordu et tourne rapidement sur lui-même par l'effet du cordon qui se détord ; vient-on à faire passer le courant dans les bobines, le cube s'arrête dans la position où il se trouve malgré la force de torsion.

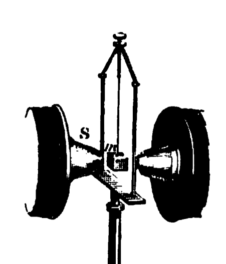


Fig. 50.

Ces expériences sont importantes, car elles montrent qu'autour des conducteurs traversés par les courants et autour des aimants, l'éther n'est pas dans la condition de celui qui environne les corps à l'état naturel. Ces faits sont la confirmation la plus décisive du principe établi dans le commencement du chapitre précédent que l'action électrique se constitue dans l'espace environnant les corps : que ceux-ci sont passifs sous son action, et que le travail exercé dans ce changement de distance se produit en une mesure différente selon la nature des corps.

Difficulté du sujet.

Mais, quand on essaye de se faire une idée précise de l'arrangement des atomes éthérés, des difficultés immenses se présentent, car nos sens n'ont aucune prise sur ces atomes. Malgré la possibilité d'expérimenter directement sur les fluides pesants et de varier les procédés de recherche, on n'a pas encore réussi à comprendre le jeu des pressions dans les couches liquides situées autour d'un corps en mouvement. Il n'est donc pas étonnant que nous soyons réduits à faire des conjectures sur la manière dont les choses se passent dans un milieu qui échappe complétement à la vue, et dont les propriétés sont totalement différentes de celle de la matière pesante. Quoi qu'il en soit, en procédant par voie d'induction, et en acceptant les analogies que nous présentent les fluides en mouvement, nous pouvons hasarder les hypothèses suivantes. Autour du courant principal, en vertu de la diminution de pression survenue dans le rhéophore de ce courant, il se développe une sorte de remous qui, dans les substances isolantes donne naissance à des variations de densité accompagnées d'oscillations, c'est-à-dire à des courants infiniment petits, et dans

Idée générale de l'induction.

les corps bons conducteurs, produit une véritable circulation intérieure définie. Dans les deux cas, l'équilibre de pression est troublé au sein de toute la masse, d'où il résulte que le milieu environnant prend un nouvel état d'équilibre. Si le corps au sein duquel les actions se manifestent est en repos, tout mouvement intérieur cesse aussitôt que ses parties se sont agencées pour une nouvelle disposition de stabilité. Lorsque le corps n'est pas fixe, comme le disque de l'appareil de Foucault, l'éther intérieur est ébranlé successivement dans les différentes parties de son étendue, d'où résulte, par effet de mouvement relatif, un changement continuel des points d'action, et par suite une agitation considérable de l'éther intramoléculaire qui, se communique à la matière pesante et se traduit par une élévation de température. Voilà de quelle façon dans l'expérience du disque tournant le travail mécanique se transforme en chaleur par l'intermédiaire du courant électrique.

On se demandera peut-être comment, lorsqu'un fil est traversé par un courant, un autre courant peut y naître et renforcer le courant primitif, phénomène qui se produit dans les spirales d'une grande longueur. La réponse est facile. Un fil, même d'un faible diamètre, représente, on ne peut en douter, un canal dont la section est énorme relativement à l'expansion moléculaire, et les courants employés dans la pratique ne parviennent jamais à imprimer du premier coup la plus grande vitesse possible à toute la masse d'éther contenue dans le rhéophore ; auquel cas le fil serait volatilisé. En réalité, ordinairement, suivant l'axe du fil interpolaire, s'établit une veine de fluide éthéré qui possède la vitesse maximum, et les parties périphériques sont relativement passives ; de même nous voyons dans un fleuve le cours de l'eau être beaucoup plus rapide vers le milieu du lit qu'en tout autre point. Alors toutes les couches conductrices situées autour de l'axe des rhéophores sont induites par l'action du courant circulant le long de cet axe, peu importe du reste que ce courant soit ou ne soit pas celui qui, un instant avant, traversait la spire précédente. On s'explique ainsi pourquoi l'intensité des courants d'induction devient plus grande lorsqu'on rapproche les unes des autres les spires de l'hélice inductrice ; en effet, de cette manière le courant

Quantité du flux dans les fils.

principal influence les parties de la masse éthérée qui n'ont pas encore pris la vitesse maximum dont elles sont susceptibles, et il agit exactement comme le ferait un courant extérieur au système. On peut encore dire que la vitesse générale du fluide dans le conducteur étant faible dans les premiers tours, elle devient graduellement plus grande par l'action de tours successifs.

C'est par un mécanisme de ce genre que, dans un fil traversé par un courant, peuvent s'en développer plusieurs autres qui se propagent tous indépendamment les uns et les autres, au moins dans de certaines limites, et qui pour se manifester à nous doivent parvenir jusqu'aux extrémités du rhéophore. L'observation ayant montré que lorsqu'un courant traverse un long conducteur, plusieurs fois replié sur lui-même, le mouvement électrique subit un notable ralentissement, cela prouve qu'il doit surmonter non-seulement l'inertie de l'éther formant le courant principal, mais encore celle de l'éther ambiant. Or, comme la force produite par la première impulsion est toujours très-faible eu égard à celle qui peut animer la *totalité* de l'éther, la masse mise en mouvement et la vitesse de l'éther augmentent à mesure que les tours de l'hélice et, par conséquent, les impulsions du courant se multiplient davantage.

Tête de l'onde électrique

La forme des ondes électriques, avons-nous dit, n'est pas la même au commencement et à la terminaison d'un fil; en outre, elle varie à l'infini avec la résistance des conducteurs et du milieu ambiant, avec la manière dont le courant est ouvert, etc. On comprend dès lors la variété et la multiplicité des phénomènes lumineux qui accompagnent la décharge des ondes soit dans les milieux raréfiés, soit dans les gaz à la pression ordinaire, et si l'on cherchait à expliquer tous les détails, autant vaudrait chercher la raison de la diversité des formes que présente un jet liquide lorsqu'on change la forme des orifices et l'intensité de la charge. Tous ces phénomènes ont le mouvement pour origine et se résolvent dans le mouvement, le mécanisme de la transformation est encore obscur en plusieurs points, mais la théorie n'en demeure pas moins parfaitement établie.

Phénomènes hydrauliques analogues.

A l'appui de la doctrine exposée ci-dessus, et en manière d'éclaircissement, nous citerons quelques faits remarquables observés

en hydraulique, car ils ont une grande analogie avec les phénomènes fondamentaux de l'induction.

Soit le fond d'un récipient AB percé d'un orifice muni d'une soupape conique C, si on vient à la soulever légèrement, aussitôt, en vertu d'une sorte d'aspiration exercée par le liquide qui s'échappe, elle est violemment réappliquée sur l'orifice.

Or, si à cette soupape on adapte un tube de verre DC (fig. 51) qui la traverse de part en part suivant son axe et s'élève au-dessus de la superficie libre du liquide dans le réservoir, lorsqu'on la soulève vivement de façon à donner passage au liquide, au même moment une colonne liquide s'élance dans le tube avec une telle force, qu'elle jaillit par l'extrémité D. C'est là purement et simplement un effet de la force vive du liquide entrant dans le tube. Ce phénomène n'a pas encore été signalé par les auteurs, et nous le citons parce que le jaillissement de l'eau dans le tube CD, au moment de la sortie de ce liquide par l'orifice L, est comparable au courant induit qui, lors de la clôture d'un circuit, se développe en sens contraire du courant inducteur.

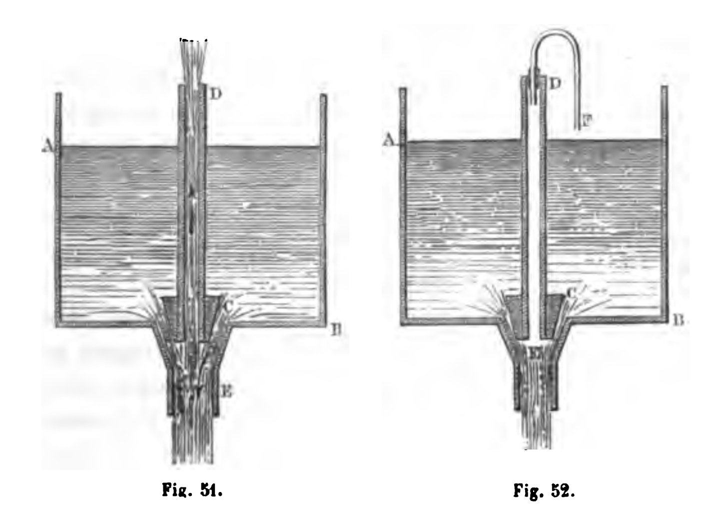


Fig. 51. Fig. 52.

Imaginons maintenant un siphon DF (fig. 52) adapté à l'extrémité supérieure du tube DC et recourbé de telle sorte que l'autre extrémité F de sa plus longue branche regarde le niveau de l'eau

dans le réservoir. Supposons en outre la longueur du siphon telle que son ouverture F puisse plonger dans le liquide au moment où la soupape ferme l'orifice E; cela posé, aussitôt que l'on arrête l'écoulement du liquide en fermant la soupape, il se produit dans le tube CD une absorption suffisante pour amorcer le siphon et déterminer un courant liquide dirigé dans le sens de celui qui existait tout d'abord.

Il serait facile de multiplier les exemples de ces curieux phénomènes restés inaperçus jusqu'ici, mais ceux que nous venons de citer suffisent. Nous ajouterons seulement que, dans un curieux appareil, l'*injecteur Giffard*, on a utilisé ces pressions négatives d'une manière très-ingénieuse, de telle sorte qu'un jet de vapeur comprimée à plusieurs atmosphères, en vertu de sa seule vitesse, traverse l'air libre sans se disperser, et absorbe encore le liquide du réservoir; et, par là, se chargeant d'eau et condensant de la vapeur, la force vive de la chaleur latente émise le rend capable de pénétrer dans la chaudière, ayant une pression égale à celle de la sortie.

Conclusions. Résumons le présent chapitre dans les quelques conclusions suivantes :

1° Les propriétés les plus caractéristiques des fluides en mouvement, le coup de bélier et la communication du mouvement latéral, se retrouvent vérifiées dans le flux électrique. 2° Lorsqu'un courant est interrompu brusquement, de telle sorte que la vitesse de l'électricité soit accumulée à l'extrémité du rhéophore, cette extrémité polaire présente une tension statique proportionnelle à la masse du fluide accumulé et à la vitesse dont il est animé. 3° Nous reconnaissons ainsi plus clairement que jamais la véritable cause de la tension électro-statique; nous voyons qu'elle consiste en *un accroissement de la masse et de la vitesse de l'éther renfermé dans un conducteur lorsque des obstacles s'opposent à sa libre diffusion.*

Cette façon de concevoir la tension statique nous sera d'une grande utilité quand il s'agira d'expliquer les phénomènes qui en dépendent.

CHAPITRE X

SOLUTION DE QUELQUES OBJECTIONS FAITES A LA THÉORIE PRÉCÉDENTE[1].

Avant-propos aux objections

Les phénomènes d'induction achèvent de nous imposer, pour ainsi dire, la persuasion que l'électricité est quelque chose de plus qu'un simple mouvement de la matière pesante. Ces expériences apprennent quelle part d'action revient au milieu isolant et au corps conducteur, et il est impossible de ne pas reconnaître l'influence d'une masse animée de translation et dont le mouvement satisfait à toutes les lois de l'écoulement des fluides. Si l'on parvient à démontrer que les phénomènes d'induction peuvent se produire sans l'intervention d'un fluide distinct de la manière pondérable, nous nous laisserons convaincre avec un véritable plaisir, car, de cette manière, le but de notre travail sera complétement atteint, puisqu'on aura fait table rase de toutes les forces abstraites, de tous les agents qui échappent à nos sens. Malheureusement, pour le moment, l'hypothèse éthérée est la seule qui permette d'expliquer tous les faits le plus simplement et le mieux.

Nous n'ignorons pas les objections adressées à ce système, mais toutes ne sont pas insolubles. Ainsi, faisant de l'éther une vraie matière, mais dans un état autre que celui propre à la matière grossière, nous n'avons pas à nous arrêter sur les difficultés soulevées par les physiciens adversaires déclarés d'un fluide immatériel. Toutefois nous ne devons pas passer sous silence le système soutenu par une grande autorité scientifique de ce siècle qui, repoussant l'hypothèse d'un fluide universel et renouvelant les idées de Fusinieri, déclare hautement que l'éther est une pure hypothèse complétement inutile. Pour nous, sans prétendre qu'un fluide universel, l'éther, soit indispensable (car quel homme pour-

[1] Le lecteur, convaincu par les raisonnement précédents, pourra laisser de côté ce chapitre, qui ne contient que la réfutation des opinions de Grove, qui sont déja abandonnées par un grand nombre de ses partisans; même en Angleterre la théorie de l'éther a fait un grand progrès et y compte ses plus puissants défenseurs. Cependant nous conservons le chapitre pour maintenir l'intégrité de l'ouvrage, et comme marque historique du temps auquel il a été écrit.

rait prononcer sur une nécessité absolue), nous regardons néanmoins les arguments fournis contre la théorie de l'éther comme facilement réfutables, et même il est nécessaire de nous livrer sur ce point à une discussion critique.

Nécessité de fixer le sens physique des mots.

Premièrement, ceux qui refusent d'admettre un fluide occupant tout l'univers, loin de repousser les agents abstraits et immatériels, comme on serait porté à le croire au premier examen, ne font que recourir sans cesse à ces forces imaginaires, sans jamais se donner la peine d'attacher un sens physique aux mots dont ils font usage. Si, entraînés par l'exemple, nous nous contentions d'employer des termes conventionnels et que nous ne nous préoccupions nullement d'en donner une définition exacte et de fixer leur véritable signification physique, il nous serait très-facile de bâtir une théorie sans avoir besoin de l'éther. Nous aussi pourrions dire : « Les attractions et les répulsions ordinaires des corps électrisés ne présentent pas plus de difficultés, lorsqu'on les considère comme produites par un changement dans l'état ou dans les rapports de la matière affectée, qu'on n'en trouve à expliquer l'attraction de la terre par le soleil ou d'une balle pesante par la terre[1]. » Mais pour avoir dit cela, le problème est-il devenu plus clair?

En quoi consistent le changement d'état et les rapports dont il est ici question? comment expliquer l'attraction des astres par le soleil et la chute des corps graves vers la terre?

Voilà la question qu'il fallait résoudre, et en se bornant à montrer l'analogie des deux phénomènes, on la laisse subsister tout entière. Sans doute, deux molécules qui se combinent peuvent se comparer à deux planètes qui se précipitent l'une sur l'autre; mais d'où vient ce mouvement? La comparaison faite jadis par Mayer n'est pas une explication.

Cercle vicieux.

Quiconque a l'expérience de la philosophie naturelle, reconnaîtra que de cette manière on résout un problème difficile en le faisant retomber dans un autre encore plus difficile. « L'hypothèse d'un fluide (dit en continuant l'auteur cité plus haut) n'est pas jugée nécessaire pour rendre compte des phénomènes dépendant de la gravité; elle ne doit donc pas l'être davantage pour rendre

[1] Grove, *Corrélation des forces physiques*, p. 121, 1866.

compte des phénomènes de l'électricité. » Si quelqu'un ne se déclare pas satisfait de cette argumentation, que lui répondra-t-on? On lui dira, comme cela est écrit plus loin : *C'est un mystère!* Mais avec les mystères on ne fait pas la physique, répliquerons-nous. Et le mystère invoqué par l'éminent physicien ne vient pas à l'appui de sa théorie, car c'est précisément ce mystère que la science moderne essaye de dévoiler.

Corollaire relatif à la gravité.

Du reste, contrairement à ce que semble croire le savant dont nous discutons les idées, il n'est point absurde de regarder la gravité comme due à l'action d'un milieu. Bien plus, nous avons le droit, en abordant le problème, de conclure comme corollaire nécessaire ce que d'autres érigent en principe fondamental. Les faits nous apprennent que tout changement d'équilibre dans l'éther produit une attraction ou une répulsion ; partant de là, rien ne nous empêche de faire un raisonnement précisément inverse de celui qui nous est opposé, et de dire : Les attractions électriques sont certainement l'effet d'un fluide; donc un fluide étant capable de produire des attractions, l'action de ce fluide peut déterminer la gravité, et, pour soutenir notre proposition, nous ne serions pas forcés de préciser le mode d'agir du fluide dans ces conditions. Mais laissons un moment de côté la comparaison des phénomènes électriques avec ceux de la gravité; nous y reviendrons plus loin. Toutefois nous ferons remarquer que si réellement les attractions électriques ne diffèrent en rien par leur mécanisme et leur principe de celles attribuées à la gravitation, néanmoins, sous certains rapports, elles répondent à nos recherches plus clairement que ne l'a fait jusqu'à présent la gravité. Par conséquent, celle-ci pourrait demeurer un mystère alors que le secret des attractions électriques nous serait déjà connu.

L'éther n'est pas inutile.

A entendre certains autres savants, l'hypothèse de l'éther est inutile, parce que ce fluide étant toujours associé à la matière pesante, en est, disent-ils, un compagnon nullement indispensable, les forces propres à la matière elle-même suffisant pour tout expliquer. Nous répondrons : L'existence de l'éther est démontrée incontestablement par la théorie de la lumière, puisqu'il agit à travers les espaces célestes en l'absence de toute matière pondérable. Les phénomènes de l'électricité nous conduisent aussi à ad-

mettre l'éther, et là seulement il serait le compagnon inséparable de la matière pondérable. La différence serait seulement en cela que les phénomènes lumineux s'accomplissent dans l'éther seul et isolé, tandis que les phénomènes électriques s'accomplissent dans cette portion du fluide qui constitue l'enveloppe des particules pondérables. Si on admet l'éther pour la lumière dans le vide, comment le refuser dans les corps transparents? La seule différence consiste en ce que ce milieu alors n'est plus homogène, comme dans l'espace absolu; aussi peut-il subir des modifications autres que celles par lesquelles il constitue la lumière. Ainsi l'hypothèse éthérée doit être admise, car elle seule nous permet d'expliquer les faits qu'on ne peut comprendre autrement. Cette hypothèse étant reconnue absolument nécessaire dans une foule de circonstances; vouloir l'écarter quand elle s'offre tout naturellement à l'esprit, ce serait agir contre le bon sens.

Quelles sont les forces admises par ces auteurs?

L'occasion se présentant de parler de ces forces dont certains auteurs dotent la matière très-gratuitement, afin de lui donner qualité pour suffire à tout, nous demanderons à les connaître autrement que par leur *nom;* nous voudrions que l'on nous apprît en quoi elles consistent et comment elles agissent. Car, à notre sens jusqu'à présent, la seule force que l'expérience ait reconnue comme appartenant en propre à la matière est sa masse animée de vitesse, et nous tenons pour jeu d'imagination toute autre force qui ne se réduit point à cela[1].

Si quelque physicien, laissant de côté l'hypothèse de l'éther, réussit à expliquer tous les phénomènes de la lumière et de l'électricité à l'aide de la seule matière pondérable en mouvement, nous sommes prêt à accepter sa théorie.

Dilemme de Grove.

L'objection tirée de ce que la matière pesante est sans cesse accompagnée par l'éther et qui semblait à Fusieneri d'une grande valeur, a été reproduite par Grove (p. 127), lequel pose le dilemne

[1] Le professeur Volpicelli, de Rome, vient de publier une très-amère critique des idées présentes et il nous reproche de *nier les forces*. (V. *Giornale arcadico*, t. LVI, 1868, p. 250). Il est évident que le savant professeur n'a rien compris à nos théories, et la lecture de notre livre ne lui serait pas inutile, car sans doute il ne nous a pas lu, puisqu'il nous reproche de faire dériver la gravité *de la réflexion des rayons solaires à la surface de la terre, qui les renvoie vers le soleil lui-même !!* Nous le prions d'indiquer où nous avons dit cela.

suivant : « Admettons que l'éther pénètre les pores de tous les corps, sera-t-il lui-même conducteur ou non-conducteur? S'il est non-conducteur, c'est-à-dire si l'éther est incapable de transmettre l'onde électrique, l'hypothèse éthérée de l'électricité tombe nécessairement, mais si c'est le mouvement de l'éther qui constitue ce que nous appelons la conductibilité de l'électricité, alors les corps les plus poreux ou ceux qui sont les plus perméables à l'éther seront les meilleurs conducteurs. Or ce n'est pas là ce qui a lieu. »

Réponse. La première partie de cette argumentation ne porte pas. Notre théorie admet que l'éther est conducteur, dans le sens qu'il est capable de transmettre le mouvement électrique ; mais que, sous ce rapport, on ne doit pas l'envisager indépendamment de la matière pesante à laquelle il est associé. Dans les métaux, ses mouvements sont libres; dans les isolants, au contraire, ses mouvements sont bornés; toutefois, l'onde se transmet également dans ces corps, mais d'une manière différente et variant avec le mode d'agrégation moléculaire qui permet le mouvement longitudinal, ou oblige le mouvement à se résoudre en vibrations transversales. En quoi consiste ce mode de groupement moléculaire, nous ne le savons pas au juste, mais nous avons présenté quelques conjectures à ce sujet (livre II, chapitre VI). La seconde partie de l'argumentation pèche par la base, car l'auteur confond assez facilement la *porosité* des corps avec leur *perméabilité* à l'éther, c'est-à-dire deux propriétés complétement différentes même au point de vue des mouvements calorifiques. En effet, l'aluminium est notablement meilleur conducteur que le plomb ; cependant sa porosité doit être beaucoup plus grande que celle du plomb, sa densité étant moindre ; de même le fer, le platine, deux métaux dont la porosité est parfaitement établie, puisqu'ils se laissent traverser par les gaz, et enfin le palladium qui absorbe une énorme quantité de gaz jusqu'à augmenter de volume, devraient être pour la chaleur des conducteurs plus parfaits que les autres métaux, conclusion radicalement fausse. Ce qui est vrai pour la chaleur l'est aussi pour l'électricité : que celle-ci soit ou non un mouvement de la matière pondérable, la perméabilité à l'éther ne peut marcher de pair avec la porosité. Bien plus, en se

plaçant à un point de vue plus général, cela reviendrait à confondre la mobilité moléculaire des corps pesants avec leur porosité, de telle sorte que l'on pourrait raisonner ainsi : la mobilité des corps dépend de l'espace existant entre les molécules, mais les substances les plus poreuses ont les espaces intermoléculaires les plus grands, donc les corps les plus poreux sont les plus mobiles et par là les meilleurs conducteurs. Absurdité manifeste, car le mercure et l'eau sont assurément plus mobiles et moins poreux que le liége. Ainsi nous échappons à ce terrible dilemme.

Instance de Grove.

Grove poursuit en insistant : « De plus, si un métal et l'air environnant sont tous deux pénétrés par l'éther, comment se peut-il que l'onde électrique affecte l'éther dans le métal et n'ébranle pas l'éther dans le gaz ?

Réponse

Cette difficulté, qui est plus sérieuse que la précédente, suppose que l'éther dans le milieu ambiant gazeux n'est pas ébranlé ; or cela n'est pas exact. L'éther dans le gaz est ébranlé, mais en tant que le permet la nature des milieux isolants, c'est-à-dire que les mouvements longitudinaux indéfinis étant très-difficiles, il s'y produit seulement une agitation et un déplacement atomique ou moléculaire qui nous est démontré par les phénomènes de l'induction.

Prétendre que l'électricité d'un conducteur communique au milieu isolant circonvoisin un mouvement semblable au sien, reviendrait à prétendre que les parois d'un tube dans lequel un courant liquide ou gazeux est établi prennent un mouvement identique à celui du fluide. Il n'est donc nul besoin d'adjoindre à l'hypothèse éthérée de l'électricité un certain nombre de suppositions accessoires, mais en raisonnant sur les propriétés de l'éther telles que l'optique et l'étude des courants nous les ont révélées, on reconnaît que, relativement à l'éther, la constitution des corps isolants et celle des conducteurs sont complétement différentes et que dans les premiers l'éther paraît avoir toutes les propriétés des solides, et dans les seconds celles des fluides.

Rôle de la matière pondérable.

Les phénomènes de rupture, de transport et de volatilisation causés par les décharges électriques sont certainement des effets qui appartiennent à la matière pondérable et qui en dépendent, mais nous pouvons nous demander : Quelle absurdité y a-t-il à ad-

mettre que l'éther ne puisse se mettre en mouvement sans entraîner avec lui la matière pondérable (point sur lequel on n'est pas fixé aujourd'hui) ? Aucune, assurément. Bien plus, une semblable supposition ne présente rien d'extraordinaire, car pour se réaliser, elle exige seulement les conditions qui rendent possible le déplacement des corps, c'est-à-dire qu'ils soient plongés dans un milieu ayant, comme les fluides, une mobilité indéfinie ; il faut, en outre, dans le cas considéré que cette propriété soit spéciale à une classe déterminée de corps pesants, lesquels pourront être assimilés à des espèces de canaux permettant d'établir à chaque instant l'équilibre de tension. Peu importe, du reste, que les communications soient établies par des canaux continus comme le sont les fils métalliques, ou bien qu'elles se produisent violemment par une série de molécules détachées des corps par l'agitation, la pression, etc.

Les phénomènes étant envisagés de la sorte, on arrive à expliquer les effets les plus extraordinaires des décharges électriques sans admettre aucune de ces actions mystérieuses qui supposent une transformation de la matière ou tout au moins des conditions dont ne peuvent nous donner une idée les phénomènes connus. Comment, par exemple, concevoir que la vapeur d'eau, par le seul fait de sa condensation, puisse devenir l'énorme puissance que nous appelons la foudre ? comment pourrait-elle condenser les molécules de soufre et de fer disséminées dans toute la masse atmosphérique, ainsi que cela devrait être d'après les *idées* de Fusinieri ? A la production d'effets aussi considérables une cause est au moins nécessaire, et puisque la foudre n'est ni l'eau, ni l'oxygène, ni l'hydrogène, ni aucun autre des éléments de l'atmosphère à l'état d'atténuation, et que le fer ni le soufre ne peuvent exister dans chacun de ces atomes d'air desquels la foudre tire son existence, force est ou d'admettre une métamorphose de la matière élémentaire, ou de reconnaître comme cause du phénomène un changement survenu dans l'équilibre de quelque matière distincte de la matière pesante, et ce serait cette matière spécifique qui, acquérant une vitesse énorme, entraînerait les particules pondérables qu'elle rencontre sur sa route.

Grove a souvent recours à des renversements subits de polari- Polarisation.

sation. Ces expressions sont d'un heureux emploi pour représenter les phénomènes ; mais nous désirerions savoir en quoi consiste l'état polaire dont il est question. Est-elle une simple disposition on orientation dans un sens défini des solides moléculaires ou atomiques ? Alors il faut démontrer comment un semblable effet peut se produire sans l'action d'un principe abstrait, appelé *force*, et en repoussant toute influence d'un milieu.

Ce n'est pas le désir de critiquer qui nous a entraîné à présenter les réflexions précédentes au sujet d'un ouvrage pour lequel nous professons la plus grande admiration, car on y trouve exposée avec un art admirable la transformation des forces physiques les unes dans les autres. Notre but est autre. Le livre de *la Corrélation des forces physiques* est dû à une plume qui fait autorité dans la science ; les arguments y sont présentés de la façon la plus séduisante, et enfin, il est écrit dans un style inimitable ; c'était un obstacle sérieux jeté en travers de la route que nous voulons parcourir, et il nous a fallu l'écarter avant de passer outre.

Autres adversaires.

Tandis que, d'un côté, dans l'explication des phénomènes de la nature, quelques savants repoussent l'influence d'un milieu quelconque autre que la matière pondérable elle-même, il y en a par contre un certain nombre qui basent toutes leurs théories sur des agents impondérables, et, à cette fin, ils en ont imaginé un nombre véritablement énorme. Ainsi font ceux qui admettent deux fluides électriques, un positif et un négatif.

Deux fluides + et —

A la vérité, pour la majorité des physiciens, ces fluides sont de simples expressions destinées à faciliter le langage ; ils ne les acceptent pas comme des réalités, et se résoudraient facilement à les abandonner.

Dans le cas particulier de l'électricité, il est aisé de réduire les deux fluides à un seul. En effet, les expériences électrodynamiques ne nous montrent jamais les deux fluides séparés, et les plus chauds partisans de la théorie de Dufay avouent que tous les phénomènes peuvent s'expliquer à l'aide d'un seul fluide. Si les deux fluides ne sont d'aucune utilité en électrodynamie, évidemment on peut s'en passer quand il s'agit de rendre compte de l'électricité statique, et revenir aux idées de Franklin, qui expliquait les effets attribués au fluide négatif par une électrisation en dé-

faut. Du reste, de tous les phénomènes examinés jusqu'ici, il n'en est aucun dans l'explication duquel il faille nécessairement recourir à ce fluide négatif considéré comme réalité distincte.

Nous avons dit combien étaient peu concluantes les preuves fondées sur la forme des explosions, sur les images lumineuses d'une pointe négative, et celles déduites de l'élévation de température plus grande au pôle négatif, car tous ces phénomènes dépendent d'une simple expansion ou mouvement de la matière pondérable, et il n'est nullement démontré que les manifestations électriques ne doivent pas différer suivant qu'elles ont lieu aux points de sortie ou aux points d'entrée du flux électrique. Il peut très-bien se faire que (comme cela arrive dans les fluides pesants), il se produise une agitation beaucoup plus vive et plus tumultueuse lorsque le courant électrique sort d'un conducteur, que lorsqu'il s'y introduit[1]. Ne voyons-nous pas dans l'injecteur Giffard, cité ci-dessus, des différences de pression étonnantes dans la vapeur qui entre dans la chaudière et celle qui en sort produites par des variations de vitesse et de changements d'état[2] jointes à des combinaisons dans la forme des orifices?

Les esprits pratiques préoccupés exclusivement des applications utiles de la science, et pour lesquels le résultat est tout, regarderont comme parfaitement oiseuse la question de savoir s'il existe un ou deux fluides, puisque dans les deux hypothèses, les faits, dit-on, s'expliquent également bien. Utilité d'un seul fluide.

A cette observation nous pouvons répondre de plusieurs ma-

[1] M. Du Moncel, qui a cru observer une différence entre les courants voltaïques et les courants induits, a beaucoup insisté sur ce que le pôle négatif du courant est celui dont la température s'élève le plus haut; et cependant on trouve dans son ouvrage divers cas où, au contraire, l'échauffement maximum appartient au pôle positif. (Voy. p. 37 et 38 et p. 134 de sa Notice sur la machine de Rhumkorff.) Il nous semble qu'il est aussi inutile de discuter sur ces détails que de vouloir distinguer soigneusement les unes des autres les diverses formes des veines liquides, selon qu'elles sortent d'un orifice ou qu'elles y pénètrent. Ces formes peuvent varier à l'infini, mais assurément leur étude ne conduira jamais à la découverte d'un nouveau principe d'hydraulique.

[2] Nous insistons sur le changement d'état qui s'accomplit dans cet appareil, car il est la source principale du travail. Il est étonnant que les météorologistes n'aient pas appliqué ce principe aux bourrasques et aux cyclones. Sans la condensation de la vapeur le cyclone s'arrêterait immédiatement : ce qui lui fournit l'élément de force qu'il déploie, c'est la chaleur développée par la condensation de la vapeur qui se trouve dans l'atmosphère. Ainsi arrive-t-il que, dans les déserts de sable, les tourbillons se trouvent bien vite épuisés et que toute leur action se réduit à amonceler du sable dans un lieu donné, sans presque aucun mouvement progressif comme cela arrive sur la mer.

Explication plus simple.

nières. Premièrement, étant accordé pour un instant que l'explication des faits soit également facile dans les deux théories, il convient néanmoins d'accorder la préférence au système qui représenterait les phénomènes de la manière la plus simple, et, sous ce rapport, la théorie d'un seul fluide est la meilleure. D'un autre côté, si la discussion à laquelle nous nous livrons en ce moment importe peu au physicien expérimentateur, il n'en est pas de même pour le physicien philosophe. Le premier se contente de classer les faits sous quelques points de vue généraux ; mais le second cherche en outre à pénétrer le mécanisme des phénomènes de la nature. On échoue fréquemment dans les recherches purement spéculatives ; néanmoins, le désir d'approfondir les problèmes n'est point blâmable. Nous croyons qu'un sage empirisme, consistant à vérifier à l'aide de l'expérience les déductions fournies par le raisonnement, est une méthode scientifique précieuse ; car, loin de fournir des ailes à l'imagination humaine, elle lui impose un lest suffisant pour la retenir loin du domaine de la fantaisie, vers lequel elle est toujours prête à s'échapper. Voilà pourquoi dans ce livre nous ne nous sommes jamais avancé d'un seul pas sans avoir éclairé notre route en mettant à profit toutes les ressources de l'expérience. A notre avis, on doit accepter comme principes un petit nombre de faits fondamentaux et y ramener tous les autres phénomènes ; de cette façon, il est possible de réduire le nombre trop considérable de forces abstraites qui encombrent la physique, et pour le moins on soulage la mémoire.

Et plus philosophique.

Nécessité de la synthèse.

Mais traiter avec une méprisante hauteur toutes les recherches faites dans la voie synthétique, et les regarder comme des tentatives déraisonnables, nous paraît une très-grave erreur ; à ses belles époques la science n'a jamais eu ces tendances, et aujourd'hui les savants les plus distingués sont très-éloignés de professer une semblable opinion. La véritable philosophie ne consiste pas à imaginer une cause mystérieuse pour expliquer chaque fait particulier, mais, au contraire, autour d'un même principe elle groupe des faits en aussi grand nombre que possible. C'est ainsi qu'elle a réuni comme effets d'une cause unique le mouvement orbitaire des planètes, la chute des graves à leur surface, le flux et le reflux des océans qui les couvrent. Parce que l'on est déjà

parvenu à ce remarquable résultat théorique, il ne faut pas croire que la cause de ces phénomènes doit être éternellement inconnue de nous ; bien au contraire, il importe de se convaincre que tôt ou tard nous arriverons à saisir le lien qui la rattache aux autres forces de la nature. A nos yeux, déclarer impossible tout progrès dans cette voie serait aussi téméraire que tenter la solution de ces problèmes avant de posséder les connaissances et les termes de comparaison nécessaires.

Le grand Newton disait : « Déduire des phénomènes de la nature deux ou trois principes généraux de mouvement, ensuite faire voir comment les propriétés de tous les corps et les phénomènes découlent de ces principes constatés, serait faire de grands pas dans la philosophie naturelle, malgré que les causes de ces principes demeurassent cachées[1]. (Autorité de Newton.)

Nous avons cité ces quelques lignes, car elles expriment clairement notre but ; nous voulons, autant que faire se pourra, montrer que les manifestations électriques se ramènent à de simples modalités de mouvement. Dès lors, ayant jusqu'ici envisagé un très-grand nombre de phénomènes comme les effets d'un flux continu, nous sommes maintenant obligé d'expliquer par le même mécanisme les phénomènes de tension.

Avant d'aborder cette étude, nous déclarons que là où d'autres, dans leurs théories, ont recours à des forces abstraites, à des agents mystérieux, nous n'hésitons pas à faire intervenir la pression d'un milieu, parce que cette action se déduit logiquement et physiquement de celle du flux lui-même.

[1] Newton, *Optic.*, lib. III, question XXXI : « Ex phænomenis naturæ, duo vel tria derivare generalia motus principia, et deinde explicare quemadmodum proprietates et actiones rerum corporearum omnium ex principiis istis manifestis consequantur, id vero magnus esset factus in philosophia progressus etiamsi, principiorum istorum causæ nondum essent cognitæ. »

CHAPITRE XI

PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-STATIQUES. — IDÉE GÉNÉRALE DE LA TENSION ET DE SES EFFETS.

Phénomènes de tension.

On désigne particulièrement sous ce nom les phénomènes que présentent les corps électrisés par un moyen mécanique, tel que le frottement, la percussion, etc. Ordinairement, dans les traités de physique, l'exposé des effets de tension précède celui de l'étude des courants; et les auteurs qui se proposent simplement de présenter la succession des faits ont raison de suivre cette méthode. Pour nous, qui supposons toutes ces notions expérimentales déjà acquises, et qui voulons profiter de l'avantage que l'on peut tirer de la connaissance des phénomènes dynamiques, afin de connaître ceux dus aux actions dites habituellement électro-statiques, nous avons réservé l'étude de ces derniers pour la fin. Mais avant de donner de ces phénomènes une théorie quelconque, il est bon de résumer leurs lois fondamentales.

La tension dérive du mouvement moléculaire.

1° *Toute électricité de tension suppose un mouvement moléculaire, antécédent, qui en est la cause efficiente.* Certains physiciens ont voulu rapporter les effets statiques de l'électricité à des actions chimiques, mais le frottement et les autres agents mécaniques sont des causes d'ébranlement moléculaire suffisamment énergiques pour engendrer l'électricité. Les phénomènes électriques apparaissent même sous l'influence d'excitations assez légères; seulement, dans ces cas, la réaction se localise à la couche superficielle, là où les molécules jouissant d'une plus grande liberté, leur équilibre peut être rompu plus facilement. Le mouvement ne pénètre pas la masse du corps et n'en modifie pas la cohésion; il se borne à modifier la surface, et la tension ne dépend pas seulement de la charge absolue, mais aussi de la forme du corps; ainsi la tension est plus intense à l'extrémité des pointes. En général, partout où les molécules présentent une liberté assez marquée, leur agitation devient plus facile à produire, elle atteint même souvent une intensité telle, qu'elles se séparent de leurs voisines.

2° *La condition moléculaire est encore ici la cause qui, entre deux corps donnés, parfaitement homogènes du reste, détermine le sens de l'électrisation, et fait que l'un des deux est positif ou négatif par rapport à l'autre.* Ainsi, deux corps de même nature et de même couleur étant frottés l'un contre l'autre, celui-là s'électrise négativement qui subit la friction la plus énergique, et l'autre se constitue à l'état positif. Une lame de verre dépolie, frottée contre une autre bien polie, s'électrise toujours négativement, et en général le plus chaud devient négatif. Détermination du signe de la tension.

3° *Les phénomènes de tension se manifestent seulement après la séparation des corps qui, par leur réaction mutuelle, déterminent la charge électrique.* Nous l'avons déjà dit plus haut : aussi longtemps que le contact entre deux corps persiste, ils ne présentent aucune tension électrique, non parce que l'équilibre moléculaire n'est pas modifié, mais parce que l'action de l'un des corps dans un certain sens contre-balance et neutralise l'action de l'autre dans le sens opposé. Souvent un corps semble en équilibre absolu et ne s'y trouve que d'une manière relative, cela se présente toutes les fois qu'il est dans la sphère d'activité d'un autre. Semblable chose arrive pour la chaleur ; le même corps indique un excès ou un défaut de tension thermique, selon qu'il est transporté dans un milieu à telle ou telle température. Par conséquent, l'état électrique absolu d'un corps ne nous est pas plus connu que la température absolue ; ce qui ne nous empêche pas d'étudier avec précision les états électriques relatifs, de même que nous l'avons déjà fait lorsqu'il s'agissait des températures relatives. La tension se manifeste à la séparation

4° *Quel que soit le procédé suivi pour développer l'électricité de tension, il s'en dégage autant de signe positif que de signe négatif.* On le vérifie aisément dans l'électrisation par procédé mécanique : il suffit de bien isoler deux corps, puis après les avoir frottés ou frappés l'un contre l'autre, de les séparer brusquement ; si alors, à l'aide d'un conducteur, les corps constitués à l'état de tension sont réunis, on obtient un courant comparable à celui qui aurait une tout autre origine ; la seule différence, c'est que les quantités d'électricité mises en mouvement par les actions mécaniques seules sont toujours extrêmement faibles, ainsi que l'on s'en assure en les employant à produire une décomposition chimique ou une Égalité du fluide + avec le fluide —.

déviation galvanométrique; aussi, pour réussir dans les expériences, faut-il recourir à des instruments fort délicats, et s'entourer de précautions minutieuses. En définitive, c'est une simple différence de quantité que l'on observe entre ces effets et ceux de même genre qui se manifestent dans tous les autres cas, où se produit une tension électrique en connexion virtuelle avec le courant.

Conclusion. Ces observations nous amènent à formuler la conclusion générale suivante. Il n'y a pas diversité de nature entre l'agent mis en activité par le frottement, la percussion, et les actions mécaniques, et celui dont nous avons parlé précédemment. Une seule particularité différentielle mérite d'être signalée, c'est que dans le cas des sources chimiques et thermiques d'électricité, la quantité est beaucoup, et la tension peu de chose; dans les actions mécaniques électro-motrices, au contraire, la quantité est faible et la tension très-grande. Ces sources électriques présentent encore la particularité que le mouvement entier se passe exclusivement dans les couches superficielles. Mais la grande question est de savoir en quoi consiste la tension et comment s'expliquent les curieux phénomènes que présentent les corps au moment où ils sont envahis par elle; ce problème se représente le même dans tous les cas de développement d'électricité, et une fois résolu pour une classe de faits, il le sera pour toutes les autres.

Cherchons donc actuellement : 1° ce qu'est l'état de tension dans les corps; 2° quelle modification cet état fait subir au milieu environnant; 3° les effets de cette modification, c'est-à-dire les mouvements attractifs et répulsifs qui en résultent pour les corps pondérables.

En quoi consiste la tension? Afin de savoir en quoi consiste l'état de tension, qu'on se reporte aux conclusions du premier chapitre de ce livre, et l'on verra qu'il doit être envisagé comme un état d'exaltation de la force répulsive qui anime la matière, même quand elle nous paraît en repos. La nature de cette force est grandement mise en lumière par les propriétés des courants, car les corps que nous disons envahis par un courant électrique, sont animés d'un mouvement intérieur parfaitement analogue à celui des fluides, et entre la *tension* et le *courant* ont été constatés les rapports suivants :

1° Toute tension électrique est susceptible de donner lieu à un courant, que celui-ci soit un véritable flux d'éther simple, ou bien qu'il soit un flux d'éther mêlé à la matière pondérable ;

2° Réciproquement, lorsque le mouvement circulatoire de ce flux est arrêté d'une manière quelconque, il se produit une tension ;

3° Si, alors qu'il est en pleine circulation, le courant vient à être interrompu subitement, on observe un excès de tension positive à l'extrémité vers laquelle se dirigeait la matière en mouvement, et un excès de tension négative à l'extrémité opposée, comme il arrive dans un fluide en mouvement en vertu de la vitesse acquise.

Conclusion.

L'ensemble de ces faits prouve que le courant étant un transport de l'éther intérieur des corps : 1° *la tension n'est autre qu'une accumulation de ce même éther dans le corps que nous disons être électrisé en plus, et une diminution dans celui que nous nommons électrisé, en moins*; 2° *l'action de la tension est parfaitement semblable à cette force qui, dans les fluides, constitue la pression*. En effet, la pression augmente dans une masse fluide par l'effet de deux causes différentes; l'accroissement de la masse, et l'accroissement de la vibration intérieure. Or, pendant l'arrêt d'un courant électrique, les deux causes en question concourent à augmenter la pression, c'est-à-dire à constituer la tension[1].

La tension analogue à la pression.

Si donc nous voyons les corps affectés de la sorte exercer des attractions et des répulsions, il nous est impossible de ne pas regarder celles-ci comme des effets de cette pression spéciale. C'est elle qui en se transmettant du corps électrisé aux objets environnants, détermine les mouvements attractifs et répulsifs propres aux corps électrisés.

Ainsi, sans sortir des faits, nous pouvons dire que toute variation de pression ou de densité dans l'éther est accompagnée de phénomènes électrostatiques; et que, par conséquent, la source de ceux-ci est tout changement de densité ou d'équilibre dans la quantité d'éther.

Comment se produit l'attraction et la répulsion.

Survient maintenant la question : Comment se fait-il qu'un tel

[1] Voir le chapitre VIII sur l'Induction.

changement d'équilibre produise les attractions et les répulsions? Cette question en elle-même est bien secondaire, bien que souvent on y attache une grande importance. Cet effet d'attraction et de répulsion consiste exclusivement en un éloignement ou un rapprochement des corps électrisés, et c'est un phénomène qui dépend manifestement de la modification que subit l'éther de l'espace intermédiaire aux corps, de sorte que cela se réduit à chercher comment cet espace est modifié par les charges électriques des corps, et comment de là peut naître un rapprochement ou un éloignement des corps.

Or il est évident que, quand même nous ne pourrions donner aucune description de cet état, cela ne serait pas une raison pour nier que la cause consiste dans la condensation et la tension de l'éther sur les corps. Nous pourrions donc être satisfait du degré du progrès fait dans la science portée jusqu'à ce point, en attendant de l'avenir de plus amples lumières, et accepter, pour le moment, comme pratiquement démontré ce principe fondamental « *que, toute condensation ou raréfaction de fluide éthéré est capable de produire des attractions et des répulsions.* »

Cependant nous voulons essayer d'examiner plus au fond la question pour nous éclairer davantage s'il est possible.

Et d'abord les circonstances mêmes dans lesquelles se produisent directement les phénomènes électro-statiques sont telles, que toutes supposent un ébranlement de l'éther constitutif des corps. Or il est évident qu'à la suite de cet ébranlement qui est accompagné de chaleur et de trouble moléculaire, la distribution de l'éther dans les molécules ne peut rester la même qu'avant, de sorte que, séparant ces molécules l'une de l'autre pendant qu'elles sont encore ainsi modifiées, nous obtiendrons, d'un côté, une masse plus chargée, et de l'autre une masse moins chargée. Cela explique pourquoi la rapidité de la séparation des corps contribue d'une manière si marquée à l'augmentation des tensions (Joulin, *Comptes Rendus*, LXXVI, page 1481). Dans ces cas, la masse éthérée est troublée au delà de la limite d'élasticité naturelle, d'où une condensation d'un côté et une raréfaction de l'autre.

Influence sur le milieu environnant. On doit ici considérer un double facteur : la quantité d'éther déplacé, et l'énergie de vibration de laquelle il se trouve animé ;

dans les phénomènes électro-statiques, la quantité est toujours faible, mais l'énergie est grande, car, à cause de la séparation brusque, la masse n'a pas le temps de s'équilibrer.

Les corps ainsi chargés soit en excès, soit en défaut, agissent sur le milieu environnant, résultat qu'on ne peut mettre en doute. Or : 1° ce milieu peut être rempli de matière pondérable ou non ; s'il est rempli de matière pondérable, celle-ci peut être 2° isolante, 3° conductrice. Si la masse intermédiaire est isolante, nous savons que cette matière transmet l'action électrique avec une vitesse très-faible (Blaserna), et qu'elle la transmet non par déplacement général, mais seulement de couche en couche, de sorte que, à l'intérieur du corps isolant se forme une espèce de polarisation. Ainsi Cantoni, en coupant un prisme de spermaceti en deux, a trouvé les deux faces nouvellement séparées chargées d'une électricité contraire et selon les lois de polarité, comme lorsqu'on brise un aimant. Les substances les plus isolantes permettent même un déplacement mesurable, comme le montrent les figures Licthtemberg tracées sur les mastics isolants avec une pointe aiguë. La pression du corps chargé agit ainsi sur le milieu isolant à peu près comme un poids sur une suite de couches compressibles (par exemple de bois tendre) c'est-à-dire que l'effet va diminuant avec la distance.

Milieu isolant.

Si 2° le corps est conducteur, nous savons que cette action de pression se transmet avec une vitesse qui peut bien se comparer à celle de la lumière ou même être supérieure (Quinke). Et nous avons déjà exposé la manière d'agir de ces corps diamétralement opposée pour les deux espèces de mouvement longitudinal et transversal.

Milieu conducteur.

Si enfin 3° l'espace est vide de matière pondérable, il reste toujours une modification du milieu capable de transmettre cette action. En vérité nous connaissons très-peu les phénomènes élastiques dans le vide : mais nous pouvons discuter leur nature. L'optique démontre que l'éther du vide transmet le mouvement transversal qui constitue la lumière, mais, par là, elle ne démontre pas que l'éther pur soit incapable de transmettre toute espèce de mouvement longitudinal. Seulement on peut dire que ce mouvement, s'il est transmis, ne constitue pas la lumière, mais

Vide absolu.

peut constituer quelque autre chose. Si, comme nous avons indiqué ailleurs, la lumière est constituée par la simple oscillation des atomes éthérés autour de leur centre de gravité, on peut bien admettre que dans des circonstances particulières un déplacement de ces atomes mêmes soit possible, et que de là surgissent des variations de densité dans l'espace même, desquelles pourraient bien résulter les phénomènes de déplacement des corps chargés que nous nommons attractions et répulsions.

Mouvements longitudinaux dans l'éther.

Mais sans nous départir de la théorie connue de la lumière, c'est-à-dire des vibrations transversales, des atomes, si on admet dans l'éther libre la possibilité d'un déplacement longitudinal, il n'y a plus difficulté à comprendre une modication de l'espace environnant capable de condensation et dilatation éthérée, et par là d'une différence d'équilibre d'où pourront bien dériver les mouvements en question.

L'existence d'un mouvement longitudinal dans l'éther a été trouvée par tous les analystes et mathématiciens qui se sont occupés de ce problème, et il n'en a pas manqué parmi eux qui ont attribué à ces mouvements longitudinaux des effets autres que la lumière, comme par exemple la gravité. Nous ne demandons pas tant ; ce que nous demandons, comme postulatum, est ceci : toutes les fois que la secousse engendrée dans l'éther excède les limites de son élasticité, on peut admettre dans ce milieu un déplacement moléculaire autre que la vibration transversale. C'est en raison de ce déplacement que reste modifié le milieu environnant, c'est-à-dire condensé ou raréfié graduellement à distance par la pression exercée sur lui par les corps matériels à la surface desquels cet éther se trouve lui-même condensé ou raréfié.

Conclusions.

Résumant donc nos idées sur la nature de l'électricité statique, nous dirons : lorsque par l'action mécanique du frottement, deux surfaces ont leurs molécules inégalement ébranlées, la couche d'éther interposée ne peut plus rester en équilibre, et, soit à cause des vibrations exagérées qui animent certaines de ces molécules, soit à cause de leurs divers degrés de mobilité, l'éther se distribue de façon à être d'un côté en quantité plus grande que de l'autre. Une fois les deux surfaces séparées, le corps qui reste avec un excès d'éther, en vertu de sa

charge plus grande et du mouvement vibratoire plus intense qui l'anime exercera une pression sur la couche contiguë du milieu isolant ambiant. Cette couche, à cause de la faible mobilité des atomes dans le sens longitudinal, éprouve un très-léger déplacement en comprimant la tranche suivante, plus celle-ci réagit sur celle qui vient après, et ainsi de suite : la compression des couches du milieu isolant se transmet donc de proche en proche, en diminuant peu à peu d'intensité. De cette façon, l'éther prend une densité décroissant avec la distance.

CHAPITRE XII

SUITE DES THÉORIES ÉLECTRO-STATIQUES : INDUCTION : ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS.

Ayant exposé comment nous concevons l'origine de la tension électrique et comment elle dérive d'une augmentation de densité, d'énergie et de pression dans l'éther qui enveloppe un corps, lorsqu'il est empêché de se mouvoir librement (chap. VIII et X), il nous reste à examiner les effets qu'elle détermine dans le milieu ambiant, c'est-à-dire l'induction; puis nous essayerons d'expliquer les attractions et les répulsions électriques. Induction statique.

Les précédentes notions une fois admises, la théorie de l'induction ne présente aucune difficulté sérieuse. Lorsqu'un corps est chargé d'électricité, il change l'équilibre de tout l'espace environnant, en y déterminant un nouveau mode de distribution de l'éther ; cette modification reconnaît pour cause effective la pression exercée par le corps électrisé et la réaction des corps circonvoisins. En nous reportant aux principes exposés tout à l'heure, la couche électrique ayant une épaisseur physique, extrêmement petite il est vrai, mais cependant appréciable, sans abandonner la surface du corps, et, par sa seule force diffusive, elle peut agir sur la couche contiguë de l'éther ambiant et par l'intermédiaire de ce dernier sur un corps placé à distance. Les effets d'une telle action diffèrent suivant que les corps sont mauvais ou bons conducteurs. Dans les premiers cas, la force diffusive de la couche élec-

trisée du corps agit sur la couche extérieure contiguë du milieu, et ainsi d'une couche à la suivante se propage une variation de densité, dont l'intensité décroît avec la distance. Lorsque le corps est parfaitement isolant, ce mouvement intérieur est excessivement petit, et la plus petite solution de continuité physiquement mesurable offre une résistance tellement grande au transport qu'elle ne peut être vaincue sans la décharge proprement dite, mais cela n'empêche pas que la distribution de l'éther du système soit complètement changée.

n p n p

A

Fig. 53.

Mécanisme de l'induction.

Considérons (fig. 53) un corps chargé électriquement A, placé en face d'un système de couches isolantes faciles à séparer les unes des autres; tel que serait par exemple un paquet de feuilles de mica bien sèches : l'observation prouve que l'état neutre de chacune des feuilles est modifié de telle sorte que la quantité naturelle d'éther devient moindre sur la face *n*, tournée vers l'inducteur, et augmente au contraire sur la face opposée *p*. On comprend que ce résultat doit arriver, car la pression du corps positif se faisant sentir à la couche superficielle *n*, du solide tourné vers l'inducteur, force la quantité naturelle d'éther répandue dans cette tranche à se porter dans la partie la plus éloignée, c'est-à-dire sur la face opposée *p*. Malgré que l'éther ne puisse pas franchir l'espace qui sépare les deux corps, par insuffisance de tension, et quitter son siége, il agit cependant et pénètre un peu par sa force expansive dans l'intérieur de la surface contiguë. Supposant donc qu'aucun échange ne puisse se faire entre le corps inducteur et le corps induit, une action semblable à la précédente s'établit entre la première feuille de mica et la seconde, et ainsi des autres. L'équilibre se trouve donc rompu dans chacune des feuilles de mica; mais il ne se manifeste rien d'extérieur aussi longtemps qu'elles restent unies et que dure l'induction. La seule face qui montre une tension est la dernière et la plus éloignée. Que l'on vienne à décharger le conducteur A et à séparer ensuite les feuilles, comme la distribution nouvelle de l'éther persiste quelque temps, on trouvera une face positive,

l'autre négative, à cause de la très-imparfaite conductibilité de la substance. Les expériences de Blaserna nous ont déjà appris que le mouvement d'induction se propage lentement dans les isolants, et les figures de Lichtemberg prouvent que l'état électrique une fois excité y subsiste longtemps. Dans cette expérience il n'y a pas action à distance proprement dite, car entre le corps électrisé A et le corps induit, aussi bien que dans l'intervalle des feuilles existe l'air, et si ce fluide fait défaut il y a toujours l'éther, qui a été l'intermédiaire de l'action inductrice de A. Les choses se passent de même dans un corps isolant continu couche par couche et les changements d'équilibre dans l'éther intérieur deviennent sensibles à la superficie du corps sur deux faces diamétralement opposées. Cela explique donc encore comment il se fait que la charge d'électricité statique se montre seulement à la surface des corps, car chaque point intérieur surchargé tend à influer sur celui qui lui est contigu, depuis les parties centrales jusqu'à la surface libre du corps, où cet échange cesse par solution de continuité.

Action électrique superficielle.

Le principe fondamental de cette théorie consiste en ce que l'éther accumulé sur une surface donnée peut presser et déplacer celui d'une couche voisine. En l'absence de tout transport effectif d'une surface à l'autre, la profondeur à laquelle atteint cette force de pénétration est extrêmement faible, mais jamais nulle. Dans cette couche superficielle les molécules présentent une mobilité fort grande. Nous avons ici un phénomène semblable à celui dont il a été parlé en optique, lorsque, étudiant la réflexion des ondes lumineuses à la surface des métaux et des corps opaques, nous avons reconnu qu'elles pénétraient quelque peu à l'intérieur du corps réfléchissant.

De plus n'oublions pas que toute tension ou pression résulte d'un mouvement réel de vibration moléculaire de la substance diffusive, mouvement parfaitement applicable à l'éther condensé sur la surface des corps ; c'est par cette tendance diffusive qu'il agit sur les couches contiguës.

Cette proposition qui sert de base à toute notre théorie électrique est appuyée par certains faits signalés par M. Du Moncel.

Si l'on maintient à environ 3 ou 4 millimètres l'une de l'autre

Expériences de Du Moncel.

deux lames de verre revêtues extérieurement chacune d'une lame métallique mise respectivement en rapport avec les deux pôles de l'appareil de Rhumkoff, on aperçoit dans l'obscurité une pluie de feu d'une belle couleur bleue qui s'échange entre les deux surfaces de verre, sans que l'étincelle passe par les bords des lames isolantes. De plus, on distingue entre les lames métalliques et les lames de verre deux raies lumineuses qui indiquent suffisamment que l'effet électrique se manifeste sur toute l'étendue des surfaces interposées entre les deux lames électrisées[1]. En examinant le courant à l'aide d'un appareil très-ingénieux imaginé par Gaugain, on a reconnu qu'il *ne traverse pas* le système mais qu'il change alternativement de sens à partir des plateaux de ce condensateur. La plüie de feu qui jaillit entre les deux feuilles de verre est donc produite par la simple arrivée du courant au niveau de la solution de continuité. Le courant parvenu en ce point y détermine un accroissement de pression qui explique l'apparition du phénomène lumineux, mais le flux électrique ne pouvant vaincre la résistance de la couche aérienne interpolaire revient sur lui-même et l'équilibre s'effectue à travers les spires de la bobine. Ce fait représente sous une forme sensible et une échelle d'amplification considérable, ce qui se passe très-vraisemblablement entre les lamelles superposées des corps stratifiés; et, par suite, il devient prouvé qu'en dehors de tout passage direct, l'électricité condensée à la surface d'un corps peut exercer une pression sur une couche isolante adjacente.

Examinons maintenant ce qui doit arriver à des masses conductrices soumises à l'influence électrique et plongés comme d'ordinaire dans un milieu isolant.

Induction dans les conducteurs.

Dans le cas où le corps placé dans la sphère d'activité d'une source électrique, est bon conducteur, il se produira dans la masse de l'électricité du corps entier ce qui arrive à une simple molécule, c'est-à-dire il y aura un déplacement général de l'éther. En effet le corps électrisé ressent dans toutes ses parties l'influence du milieu modifié, et, en vertu de la mobilité de l'éther dans ces substances, la charge naturelle sera repoussée sur la face la plus

[1] Voy. Du Moncel, *Notice sur la machine d'induction de Rhumkorff*. Paris, 1867. 5e édition, p. 150.

éloignée de l'inducteur, la pression se faisant sentir moins énergiquement en ce point. Pendant la durée de l'influence il ne sera pas facile de déterminer exactement la véritable condition du conducteur induit, parce que le phénomène se complique des réactions exercées par l'éther environnant ; toutefois on peut y arriver en ayant recours à certaines dispositions expérimentales. Par exemple on peut employer un conducteur induit formé de deux parties, faciles à séparer l'une de l'autre avant que l'on décharge l'inducteur ; alors on trouve sur la portion de ce conducteur qui était voisine de la source positive, une tension négative, et sur l'autre partie une tension positive. (Wilde.)

Il est clair que si l'inducteur est négatif, le véritable corps inducteur positif sera celui pris à l'état naturel, et les phénomènes se reproduiront les mêmes à la différence des signes qui seront renversés.

Nous n'avons donc nul besoin, comme on le voit, d'invoquer une action à distance pour expliquer l'induction ; il suffit d'admettre que l'électricité condensée à la surface d'un corps agit par pression sur l'éther de la surface d'un autre corps en contact avec le premier (isolant ou non) sans qu'il y ait transport effectif, mais en vertu de la simple force diffusive propre à l'éther ; de telle sorte que l'excès de la surface électrisée se trouve compensé par un déficit dans la couche contiguë de la matière environnante.

L'électricité induite a dans ces dernières années soulevé de nombreuses controverses. La plupart des physiciens disent qu'il se fait là un développement de *tension* : d'autres soutiennent le contraire. Mais un état électrique sans tension est un contre-sens, puisque c'est la tension, au moins la tension relative, qui constitue tout état électrique. Dès lors, si les corps induits n'ont pas de tension, ils ne sont pas dans un état électrique, ce qui est absurde. Dernièrement on a expliqué cet état sans tension, en ce sens que l'action du cylindre induit négatif, par exemple, étant paralysée par l'action du cylindre induisant positif, était nulle à l'extérieur, et par là sans tension. Dans ce cas, nous dirons que tout le monde le comprenait bien de cette manière, et qu'il était inutile de proclamer cela avec grand bruit comme un principe nouveau, et sous cette forme assez étrange *que l'électricité*

Tension de l'électricité induite.

induite ne tend pas, car il est bien connu que l'action à distance de deux charges égales et contraires est nulle.

Tension négative.

Pour nous, faisant de la charge électrique une mutation d'équilibre de l'électricité naturelle, l'électricité négative ne peut avoir une tension puisqu'elle n'existe pas. Mais on entend par tension négative ce qui manque pour établir l'équilibre naturel. Quelques-uns ont cru trouver une objection à l'ancienne théorie dans le fait qu'un conducteur soumis à l'influence d'une source positive devient négatif, après la mise en communication avec le sol de l'extrémité la plus rapprochée de l'inducteur. Il semble qu'alors l'électricité positive doive rencontrer nécessairement l'électricité opposée avant de se décharger dans le réservoir commun, chose impossible. Cette difficulté est aisée à résoudre. Soit (*fig.* 54) le cylindre CD isolé et placé en face de la sphère P, il est positif en D et négatif en C;

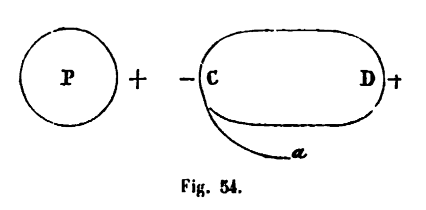


Fig. 54.

mis en relation avec le sol à l'aide d'un fil conducteur *a*, il devient aussitôt entièrement négatif. Un tel résultat n'entraîne pas nécessairement la conclusion précitée. En effet, la communication une fois établie, le cylindre ne doit plus être considéré comme le corps de dimensions finies que nous avions auparavant; il devient un corps d'étendue immense dont fait partie le globe terrestre, avec lequel il est en contact médiat et dont il est, pour ainsi dire, une extrémité. Dans un pareil système la charge négative doit se distribuer sur la partie la plus voisine de la force inductrice, c'est-à-dire sur le cylindre et le fil conducteur. Et il n'y a aucune impossibilité physique à ce que, pendant l'établissement du nouvel état d'équilibre, la quantité d'éther primitivement condensée dans la partie éloignée s'échappe dans la terre en passant par l'extrémité C, et peut-être ne serait-il pas impossible de le reconnaître avec un galvanomètre fort délicat.

Quant aux expériences de Melloni et de tous ceux qui ont prétendu prouver l'absence de tension dans les corps induits en mettant des plaques métalliques entre les petits pendules attachés au cylindre soumis à l'influence ou en employant d'autres disposi-

tions analogues, quels que soient les résultats obtenus par ces expérimentateurs, ils ne sont pas concluants; car les pièces ajoutées au cylindre constituent en réalité autant de nouveaux systèmes soumis à l'influence. Dans de semblables conditions, les expériences s'éloignent beaucoup des cas théoriques que l'on se propose de vérifier; il n'y a donc rien d'étonnant à ce que les résultats obtenus ne concordent pas avec les théories soumises au contrôle de l'expérience, et leur discussion ne doit pas nous arrêter.

Attraction et répulsion.

Arrivons enfin aux attractions et aux répulsions, dont la théorie a fait imaginer tant de forces diverses. L'idée fondamentale pour leur explication est celle-ci : toutes les fois que l'éther se trouve en excès ou en défaut dans un corps, l'équilibre tend à se rétablir par tous les moyens possibles ; et par conséquent la force vive de l'éther pourra se communiquer à la matière pondérable, laquelle se mettra en mouvement si elle est suffisamment mobile, d'où ces mouvements des corps légers, appelés attractions ou répulsions. La cause déterminante de ces mouvements est l'énergie de l'éther condensé, qui produit encore la condition spéciale de la matière électrisée nommée ordinairement état répulsif. Quelques-uns expliquent cette condition par une atténuation de la matière pondérable superficielle : nous, au contraire, nous l'attribuons à un accroissement de la charge d'éther. Cela n'exclut pas le mouvement moléculaire qui du corps pondérable se transmet à l'espace ambiant plein ou vide.

Différence de la tension électrique et calorique.

Cependant il ne faut pas confondre la tension électrique avec la tension calorique. La seconde est impossible à conserver dans les corps, et elle se dissipe malgré tous les soins possibles, car elle consiste dans une simple oscillation qu'on ne peut empêcher de se transmettre : au contraire la charge électrique peut se conserver très-longtemps, en empêchant le contact de matière conductrice. La tension électrique présente encore une autre différence, car il suffit de toucher le corps électrisé par un seul point pour le décharger d'électricité, ce qui ne s'obtient pas pour le décharger de chaleur. Il faut conclure de là que cette charge électrique contient un élément plus mobile que la matière pondérable et sa vibration : un fluide accumulé, en un mot.

On n'a pas manqué de nous objecter que si l'électricité de tension est un mouvement, sa déperdition devait être immédiate, de sorte qu'un corps ne pourrait jamais conserver une charge électrique. Les vues théoriques développées ci-dessus nous fournissent une réponse facile à cette objection. Il ne s'agit pas ici d'un simple mouvement, mais d'un fluide accumulé ou raréfié, et qui pour sa décharge exige une communication matérielle de contact; quoique cette accumulation coexiste avec une exaltation de l'état répulsif.

Cela posé abordons la théorie des attractions et des répulsions. Dans les substances isolées, avons-nous dit plus haut, l'éther accumulé n'est pas libre de céder à tous les mouvements, par conséquent s'il exerce une pression supérieure à celle que comporte l'état naturel du corps sur lequel il est condensé, il en résulte une force. Cette force devant nécessairement être équilibrée, cela ne pourra se faire que, ou par le transport de l'éther, ou par le transport du corps à la surface duquel l'éther est adhérent, dans le cas où il présente une mobilité suffisante. Considérant l'action résultante de la tendance expansive de l'éther, on reconnaît que nécessairement :

1° Cas de deux corps positifs.

1° Deux corps électrisés en excès doivent s'éloigner l'un de l'autre.

Soient (fig. 55) deux sphères égales chargées par excès ; chacune en vertu de sa force répulsive exercera une pression sur l'éther circonvoisin ; et dans l'éther occupant l'intervalle AB la pression sera la somme des deux, tandis que dans l'espace extérieur MN la pression est simple et peut, du reste, se répandre dans le milieu non condensé. Par conséquent, en vertu des lois d'équilibre dynamique, si les sphères présentent une suffisante mobilité, leur distance augmentera nécessairement. En effet, le rétablissement de l'équilibre ne pourrait se faire que de deux manières : ou l'éther de l'intervalle AB se retire de lui-même vers les parties éloignées M et N, ou la distance des deux sphères A et B augmente. Le premier cas se rencontre quelque-

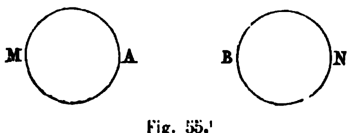


Fig. 55.

fois, mais seulement lorsque les corps en présence sont conducteurs et inégaux : alors il y a déplacement d'éther, changement d'action qui donne lieu à l'attraction (Plana). Négligeons cette circonstance particulière pour le moment.

Dans le cas général, comme chacun des deux corps tend à modifier l'éther de l'espace et que cette action se trouve doublée dans l'intervalle qui les sépare, il est clair que pour établir une distribution uniforme les deux sphères devront s'éloigner ou, comme on dit, se repousser.

A cet éloignement contribuera l'action des parties extérieures M et N ; car l'éther étant condensé à la superficie des sphères fait effort pour se répandre dans les couches éloignées.

2° Quand les deux corps en présence sont électrisés, l'un positivement, l'autre négativement, les conditions d'équilibre exigent, par une raison contraire, leur rapprochement. De cette façon seulement se trouveront compensées les différences de pression qui sont de signe contraire, non-seulement dans l'intervalle des deux sphères, mais aussi dans tout l'espace environnant ; car l'influence par excès de M s'étend au delà de N et réciproquement. Donc l'équilibre ne pourra s'établir que si les deux corps se rapprochent d'un même point autant que possible. 2° Corps électrisés en sens opposé.

3° Dans l'hypothèse de deux corps négatifs, il est nécessaire d'examiner l'action du milieu étendu entre eux et au delà d'eux. Les sphères étant électrisées en moins, dans l'intervalle AB, il y a une véritable raréfaction ; or, de cette raréfaction ne peut résulter ici, comme dans un fluide ordinaire, un effet d'aspiration chassant les corps l'un contre l'autre, car le milieu, en raison de son pouvoir isolant, ne permet pas à l'éther d'affluer des points éloignés et d'agir par voie de communication directe. Ainsi le milieu qui sépare les deux sphères, éprouvant à ce moment une raréfaction, est incapable de fournir la quantité nécessaire au rétablissement de l'équilibre des deux corps. Par contre, dans les parties opposées M et N, se trouvent les conditions du second cas, c'est-à-dire l'action de l'espace *relativement* positif qui agit pour écarter les deux sphères l'une de l'autre. Je dis relativement positif, car les objets environnants et l'espace lui-même à l'état naturel jouent le rôle d'un corps positif mis en présence d'un autre 3° Cas des deux corps négatifs.

négatif et mobile. Ainsi l'éloignement réciproque de deux sphères électrisées en moins s'explique sans qu'il soit nécessaire d'admettre une vraie force répulsive dans la matière.

Corps naturel et électrisé.

Enfin un quatrième cas se présente, celui d'un corps naturel placé en regard d'une source électrique; mais on retombe alors dans un des cas précédents, car nous avons reconnu, en étudiant l'induction, que, dans ces conditions, tout corps mobile neutre, avant d'être attiré, est par influence électrisé contrairement à l'inducteur.

Les attractions et les répulsions s'exercent aussi dans le vide, mais nous ignorons d'abord comment elles sont alors modifiées quant à leur degré d'intensité; ensuite jusqu'à quelle limite le vide lui-même est isolant et empêche la décharge. Il semble que les phénomènes d'induction et, en général, tous ceux d'origine électrique, se manifestent d'autant plus facilement que la résistance du milieu est moindre. Par exemple, les substances gazeuses, qui dans leur état ordinaire sont isolantes lorsqu'elles sont raréfiées, deviennent conductrices, mais en même temps elles donnent lieu à des décharges lumineuses. Il reste encore beaucoup à savoir sur ces phénomènes, et, sans nul doute, les résultats fournis par leur étude approfondie jetteront une grande lumière sur nos idées théoriques. Disons cependant que, d'après les expériences de M. Gaugain, l'induction ne se fait pas seulement par l'air, mais que l'éther y joue un certain rôle, puisque la densité de l'air étant réduite à $\frac{1}{17}$, la force d'induction ne change pas.

Nous remarquerons enfin que l'induction a des limites très-définies : si la tension devient excessive l'induction ne subsiste que comme une phase indivisible qui dispose au rétablissement violent de l'équilibre par la décharge. Cela arrive lorsque la tension surpasse les limites d'élasticité du milieu : alors l'induction est comme la première phase d'une vague qui forme le principe du courant. Nous allons étudier cette nouvelle série de phénomènes électriques.

CHAPITRE XIII

DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES ET DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

Phénomènes lumineux des décharges + et —.

De l'exposé précédent, il suit que les phénomènes d'attraction présentés par les corps négatifs ne diffèrent réellement pas de ceux qui nous sont offerts par les corps positifs ; mais cela n'entraîne pas une parfaite identité de tous les autres phénomènes correspondant aux deux états électriques. Selon que l'électricité sort d'un conducteur ou y rentre, la modification du milieu ambiant n'est pas rigoureusement la même. Ainsi voyons-nous, en hydrodynamique, dans les liquides, la forme d'un jet liquide à la sortie d'un vase différer de celle du tourbillon d'entrée. Depuis longtemps les observateurs ont noté les diverses formes de la décharge lumineuse, qui, lorsqu'elle est positive, présente l'apparence d'une aigrette, et celle d'une petite étoile, quand elle est négative ; mais elles ont été rendues plus évidentes par les expériences bien connues faites dans les gaz raréfiés.

On se tromperait beaucoup si l'on voulait tirer des phénomènes lumineux caractérisant chacune des pointes terminales d'une batterie électrique quelques conclusions relatives aux manifestations calorifiques à ces mêmes pôles. En effet, la lumière surgit d'une violente agitation d'un petit nombre de particules, et la température suppose une vibration générale de toute la masse ; les deux phénomènes ne sont donc pas de même ordre, bien que les deux produits mV^2 et Mv^2 soient égaux ; ajoutons encore que la matière des deux pôles est soumise à un travail différent, puisque, d'un côté, il y a disgrégation de particules pesantes et de l'autre dépôt : conséquemment, la température en ces deux points doit être différente. Dans certaines expériences, le pôle négatif peut être bien le plus chaud, mais alors il n'est ni le plus lumineux, ni celui duquel jaillit la décharge. Cette réflexion peut expliquer certaines anomalies de l'échauffement des pôles que nous avons indiquées ailleurs.

Quand la densité de l'éther, et avec elle l'agitation des molé-

Décharge électrique.

cules matérielles disséminées dans sa masse, acquiert une intensité suffisante pour excéder les limites de la cohésion qui maintient les particules pesantes sur la surface des corps, celles-ci se détachent, et la charge s'équilibre en transportant les molécules elles-mêmes, et en les animant d'une vibration tellement violente, qu'elles arrivent à l'incandescence. Évidemment la décharge est provoquée par la tension de l'éther, mais elle est grandement favorisée par la matière pesante qui se transporte avec ce fluide pour rétablir l'équilibre. Ainsi la décharge dite *disruptive* ne diffère pas essentiellement du mouvement de translation d'une balle de sureau en présence d'un conducteur électrisé ; seulement, pour détacher d'un corps quelques parcelles de la couche superficielle, il faut une force de beaucoup supérieure à celle qui met en mouvement une balle de sureau, car, dans ce dernier cas, la seule résistance à surmonter est l'action de la gravité. En résumé, la théorie de tous ces mouvements, qui est incompréhensible alors que l'on repousse l'intervention de la matière impondérable, devient aisée, au contraire, dès l'instant où l'on admet l'existence d'un éther, de sorte que notre hypothèse embrasse l'ensemble des phénomènes physiques connus et établit entre eux de remarquables relations.

Travail de la décharge.

Durant les décharges électriques, un véritable travail est accompli par la force vive de l'électricité accumulée sur les corps en présence. La nature du travail varie beaucoup ; tantôt c'est le simple transport des molécules d'un corps isolant arrachées et entraînées pendant le rétablissement de l'équilibre ; tantôt c'est une élévation de température ou une volatilisation des fils conducteurs ; d'autres fois c'est une décomposition chimique, ou bien encore une induction magnétique. Les puissantes décharges (celle de la foudre spécialement) produisent tous ces effets simultanément, et, par suite, la mesure de leur intensité est fort difficile. Cependant, dans certains cas, les effets du travail sont manifestes. Ainsi les expériences de Riess ont appris que la décharge d'une même batterie produit un effet thermométrique beaucoup plus prononcé lorsqu'elle jaillit sur le thermoscope à travers une simple couche d'air, que lorsqu'elle est forcée de traverser un isolant, une feuille de verre ou de mica par exemple. Tandis que, dans le premier cas,

l'élévation de température était de 15°,9, dans le second, elle atteignait seulement 6°,8[1]. Lorsque le corps isolant interposé est le verre ou le mica, et non l'air atmosphérique, le travail de perforation devenant beaucoup plus grand, l'autre partie de la force vive, qui dans l'arc de décharge se traduit sous forme de chaleur, diminue d'autant.

Transport de matière pondérable.

Au moment des décharges, de notables quantités de matières sont volatilisées et transportées, et on peut comparer la transmission des particules pesantes d'un pôle à l'autre à l'entraînement des cendres et du noir de fumée dans le tuyau d'une cheminée, par le courant d'air alimentant le foyer. Le transport de la matière qui accompagne les étincelles électriques s'effectue par une sorte de vibration, comme le montrent les figures d'étincelles obtenues par Feddersen (voyez plus haut) et aussi les faits observés par de la Rive et Fusinieri, qui, faisant passer la décharge dans des gaz raréfiés et concentrant son action sur des fils minces, ont vu les globules fondus et les parties d'une plaque dépolies par la volatilisation former une série d'anneaux concentriques. Ces oscillations sont évidemment dues aux vagues découvertes par Blaserna dans l'ouverture et la fermeture du circuit très-court de la décharge.

Il ne faut pas confondre le mouvement de la matière pesante que l'on observe dans les décharges avec la cause qui lui donne naissance. Celle-ci est généralement la force vive de l'éther accumulé et excité à la surface du corps par des actions mécaniques ou d'autres semblables. Au moment où il se met en équilibre, il accomplit divers travaux, entre autres celui de détacher et de transporter les molécules des corps qu'il rencontre et de ceux sur lesquels il est accumulé. Dans ces conditions, les molécules en mouvement vibrent énergiquement pour échapper aux obstacles qui les gênent et qui s'opposent à leur déplacement. Toute pression n'est pas un mouvement purement virtuel, c'est un mouvement réel, mais d'une amplitude fort restreinte, comme nous l'avons dit en traitant du calorique : ainsi l'éther condensé qui

[1] *Archives des sciences naturelles*, 1868, t. I, 296. Pour de plus amples renseignements, lire le Mémoire de Clausius. Pogendorff. Ann. t. LXXXVI, p. 337, et t. LXXXVII, p. 415.

exerce une pression en se déchargeant, ébranle les corps qu'il rencontre.

Solution d'une objection.

On nous objectera peut-être que nous ramenons la science à son berceau en fondant notre théorie sur les pressions électriques, conception déclarée inacceptable par les géomètres qui ont traité ce sujet. Mais la réponse est facile. D'abord l'idée de pression découle naturellement de celle de courant, admettre l'une, c'est admettre l'autre. De plus, les premiers physiciens qui ont parlé des pressions électriques n'ont signalé ni surtout prouvé l'existence de relations entre ces pressions et la constitution de la matière. Aujourd'hui il n'en est pas de même. On comparait habituellement cette pression à celle qu'une masse fluide exerce dans tous les sens avec une égale intensité; on en faisait un effet statique, nous avons montré qu'au contraire cette pression est un phénomène dynamique; elle tend réellement à se répandre dans tous les sens, mais elle ne produit pas son effet avec une égale intensité dans toutes les directions, parce que l'éther ne peut au sein des isolants prendre un mouvement de translation longitudinale indéfini. L'impossibilité des mouvements longitudinaux de l'éther est la cause première de ces forces qui régissent l'équilibre interne des corps diaphanes; forces dont l'existence nous a été révélée par l'optique. Dans les théories proposées par les anciens partisans des pressions électriques, cette remarquable relation n'a jamais été signalée. Du reste, quand même nous ressusciterions un système abandonné, s'il est conforme à la nature, le blâme ne peut retomber sur nous, mais sur ceux qui délaissèrent une hypothèse juste pour courir après de vaines ombres, et se perdre dans le dédale des forces abstraites, pures fictions de l'imagination.

Toutefois il est juste de remarquer que les géomètres échappent à toutes ces critiques. Ils ont pris pour base de leurs calculs le fait que deux corps infiniment petits (c'est-à-dire deux éléments différentiels), *chargés de cette force qui les rend électriques de même nom se repoussent, et s'attirent au contraire lorsqu'ils ont des états électriques de nom contraire*. Ce principe fondamental une fois admis, le calcul en dégage diverses conséquences; mais il reste impuissant à démontrer l'exactitude du premier fait, les conclusions ne pouvant avoir que la force des prémisses, quand

les déductions sont légitimes ; et tel est notre cas. Cependant quelques mathématiciens ont voulu aller plus loin et déterminer la nature de la cause première des phénomènes.

Mais réellement ils n'ont rien démontré, aussi Mossotti, dans un travail fort estimé, reconnaît la nécessité d'admettre un nombre vraiment énorme de forces, et de supposer à l'action de chacune d'elles des limites purement arbitraires. Ainsi il faut admettre . 1° une répulsion entre l'électricité et l'électricité ; 2° une répulsion entre la matière et la matière ; 3° une attraction entre l'électricité et la matière ; 4° supposer la répulsion moindre que les attractions, pour ne pas se trouver en opposition flagrante avec la gravitation universelle. Théorie de Mossotti.

Ces forces s'introduisent assez aisément dans les formules mathématiques, mais elles sont loin d'avoir la simplicité qui caractérise les puissances naturelles.

Et alors se présente l'éternelle question *en quoi consistent ces forces* Quelle idée physique pouvons-nous nous en former? à cette question personne n'a répondu jusqu'ici. Ces difficultés sont sérieuses, mais toute supposition secondaire devient inutile, une fois que l'on a admis l'éther comme principe constitutif des corps.

Le jour où il sera démontré que, dans l'explication des phénomènes électriques, le rôle attribué à l'éther est une inutile superfétation et que les propriétés de la matière pondérable permettent d'expliquer les moindres détails, tout en conservant des rapports très-étroits entre les faits de cet ordre et les autres branches de la physique, ce jour-là, nous éprouverons une vive satisfaction.

Plusieurs physiciens modernes ont recours aux polarités pour expliquer cela : mais d'abord on peut leur demander, qu'est-ce que la polarité? entend-on par là *deux forces statiques égales et contraires* dont l'action est concentrée à l'extrémité d'une molécule infiniment petite. Alors la résultante extérieure d'un pareil système doit être simplement nulle ou au moins elle doit varier avec la distance suivant une loi autre que celle trouvée par voie expérimentale, c'est-à-dire celle des carrés. La résultante extérieure sera nulle si la distance des pôles est infiniment petite, elle variera en raison inverse du cube des distances lorsque la distance des deux Polarité.

pôles opposés n'est pas négligeable[1]. J'ai dit forces égales, parce que, en dehors de cette condition la vraie polarité ne saurait subsister, et on ne pourrait qu'imaginer une force arbitraire n'ayant aucune signification naturelle. En outre, au sujet de cette polarité, on peut se demander : son existence dans les corps est-elle essentielle ou seulement accidentelle? si elle est essentielle, comment se fait-il que dans les corps, sous l'influence des causes les plus légères, se manifeste alternativement tantôt l'une, tantôt l'autre des deux composantes du couple polaire ; la question n'a donc pas fait un seul pas, et la difficulté se représente tout entière, puisqu'il reste à trouver l'agent qui détermine chaque fois le sens de la polarité, si bien que la cause principale du phénomène réclamant elle-même une cause déterminante, nous nous engagerions ainsi dans une série de causes successives sans jamais arriver à une dernière, et de plus nous ne saurions pas davantage en quoi consiste l'état polaire. Ampère est le seul, à notre avis, qui ait réussi à formuler une notion exacte de la polarité. Il se fonde sur les rotations moléculaires, lesquelles, bien que très-petites exercent toujours une action égale et contraire en deux points opposés. En mécanique, on fut longtemps avant de connaître des phénomènes comparables à ceux de la polarité ; mais, dans ces dernières années, la découverte des curieuses propriétés spéciales aux corps animés de rotation, l'étude de la composition de leurs mouvements ont fourni des faits remarquables très-propres à éclairer ces théories, jusque-là fort obscures. Toutefois, qu'on ne s'y méprenne pas, la considération de ces polarités ne donnera jamais directement l'explication des phénomènes électro-statiques. On ne déchargera jamais un aimant comme on décharge un conducteur. Dans la polarité il n'y a rien d'ajouté au corps, mais il y a quelque chose de plus dans le corps électrisé.

Polarité selon Ampère.

Bizio a fait connaître une théorie fort ingénieuse des polarités chimiques basée sur les lois de l'équilibre. Supposons, dit-il, les

Théorie de Bizio.

[1] Les actions exercées à une distance D seraient exprimées, pour le pôle positif, par la formule $\frac{M}{D^2}$ et, pour le pôle négatif, par cette autre $\frac{-M}{(D+x)^2}$. Si x est infiniment petit et négligeable par rapport à la distance finie, évidemment les forces sont égales ; si x n'est négligeable que pour ses puissances supérieures à la troisième, la différence des deux forces variera en raison inverse du cube des distances.

molécules de volume différent; lorsqu'elles sont accolées, le centre de gravité du système ne coïncide pas avec le centre de figure, par conséquent la résultante des forces du courant doit orienter les molécules, de telle sorte que toutes les parties présentent leur centre de gravité dans une position homologue par rapport à la forme extérieure (comme on le voit dans une série d'aréomètres flottant au sein d'un même liquide). Par conséquent, les molécules les plus petites seront dirigées d'un même côté et il y aura une polarisation. Cette théorie n'échappe pas à l'écueil contre lequel toutes les autres viennent échouer; elle est insuffisante, parce qu'il reste à chercher la cause qui dispose les molécules de la façon indiquée. Ainsi la polarité ne peut jouer le rôle de force première, mais l'existence de l'éther une fois admise, elle permet d'expliquer un grand nombre de faits en mettant à profit les idées de Bixio.

Assurément, la tâche est plus facile lorsqu'on explique les phénomènes en supposant des forces abstraites, principes internes agissant à distance ; malheureusement il faut en imaginer un nombre si considérable que tous ceux qui ont examiné la question à ce point de vue, ont reculé devant une telle complication.

Notre seul désir est d'arriver à la vérité et non de défendre des idées personnelles quand même elles seraient nôtres pour le fond et pour la forme, à plus forte raison si, comme dans le cas actuel, cette théorie ne fait que reproduire certaines idées dont on peut retrouver la trace dans les ouvrages des physiciens, qui, en dehors de leur recherches expérimentales, se livrèrent aux spéculations de la philosophie naturelle. Une telle démonstration, si tant est qu'on parvienne à l'établir, couronnerait tous nos efforts, car son résultat immédiat serait de faire disparaître de la physique les forces abstraites et toutes les causes d'origine occulte.

Électricité atmosphérique.

Une puissante source d'électricité statique dont nous n'avons point parlé jusqu'ici, c'est l'électricité atmosphérique; aussi ne pouvons-nous terminer ce chapitre sans en dire quelques mots. Elle a été l'objet de travaux très-nombreux, et cependant nous ne possédons encore qu'un bien petit nombre de faits certains. L'atmosphère par un ciel serein est constamment chargée d'électricité

positive, elle devient négative au moment et à l'approche des orages; ce qui évidemment est un effet d'influence de la part des masses positives. D'où vient cette électricité? Quelques savants l'expliquent en disant que l'espace est électrisé positivement et la terre négativement. D'autres, et c'est le plus grand nombre, regardent l'évaporation comme la source de l'électricité atmosphérique. Cette théorie a été vivement attaquée, à tort suivant nous. Nulle action calorifique ne peut avoir lieu dans la matière pondérable sans déterminer une rupture d'équilibre et un mouvement de l'éther, et par suite sans être accompagnée d'une manifestation électrique. Aussi sommes-nous portés à croire que la vapeur pendant son développement soustrait de l'électricité aux corps terrestres en même temps qu'elle leur emprunte du calorique latent; cette électricité ne devient pas sensible tant que la vapeur garde l'état élastique sous lequel elle s'est élevée du sol; mais, lors de sa condensation, elle dégage à la fois électricité et calorique, et l'on explique ainsi la charge électrique que l'on observe au moment de la condensation de la vapeur. Une telle conception est rationnelle; ne voyons-nous pas la tension électrique augmenter à mesure que diminue la surface du corps électrisé, et le dégagement de l'électricité dans ce cas n'a-t-il pas pour homologue celui de la chaleur latente d'une vapeur qui devient sensible lorsque celle-ci se condense? Le fait si connu qu'une averse de pluie se précipite immédiatement après un éclair intense, prouve que la condensation de la vapeur est accompagnée d'une augmentation de tension. De même le développement des vapeurs doit être accompagné de l'absorption de l'électricité.

Son origine.

Confirmation.

Quant aux couches de l'atmosphère elle-même, elles doivent être électrisées positivement par l'électricité qui est abandonnée dans les airs au moment de la condensation de la vapeur. Cette tension doit être considérable dans les hautes régions et agir par influence sur les corps terrestres selon les changements de distance, relativement à ces couches. Ainsi un corps en s'élevant subira une induction de genre opposée à celle qu'il subit en descendant. De là l'explication des phénomènes du conducteur électrique mobile. La masse atmosphérique étant très-vaste peut bien conserver un état électrique spécial dans ses différentes régions, comme nous

voyons l'air d'une vaste salle garder l'électrisation assez longtemps après une suite d'expériences électriques.

Cette théorie est grandement fortifiée par le fait certain que les variations de l'électricité atmosphérique sont parallèles à celles éprouvées par la vapeur d'eau répandue dans l'air, et ces variations hygrométriques ne sont pas seulement ces perturbations profondes causées par les précipitations abondantes qui engendrent les orages et la grêle auxquels cas invariablement une condensation rapide de vapeur s'accompagne de violentes décharges électriques, mais encore ces fluctuations plus calmes qui se renouvellent chaque jour. Ainsi la tension électrique de l'air augmente le soir quand la rosée commence à se déposer, et augmente d'autant plus que le dépôt est plus abondant. La tension est énorme en été lorsque la condensation se fait en masses très-grandes au milieu d'un air chaud et isolant, car la déperdition est alors très-faible, d'où la fréquence et la violence des orages à cette époque de l'année. Par contre, dans la saison pluvieuse, la condensation s'opérant au sein d'une atmosphère humide touchant au sol, la tension se neutralise au fur et à mesure qu'elle se développe; aussi les orages sont ils rares, ou viennent tout au plus au commencement des bourrasques et des pluies très-abondantes.

Plusieurs savants n'acceptent pas cette théorie extrêmement simple, et continuent à regarder le problème de l'électricité atmosphérique comme non résolu, car ils refusent à l'évaporation la faculté de développer l'électricité. Ne cherchons pas en ce moment à décider si nous devons accorder toute confiance aux expériences faites dans le but de prouver que l'évaporation est par elle-même une source d'électricité; peut-être faut-il aussi faire jouer un rôle aux actions chimiques concomitantes. Mais ne semble-t-il pas difficile d'admettre qu'un changement d'état, tel que le passage d'un liquide à l'état de vapeur puisse s'accomplir sans déterminer un changement dans l'équilibre de l'éther. D'ailleurs les expériences contradictoires faites en opérant dans des creusets de platine rougis à blanc sont peu ou point concluantes; parce que le liquide projeté dans ces creusets passant à l'état sphéroïdal et la vapeur qui s'en sépare étant sèche, il peut parfaitement arri- Influence des actions chimiques

ver que la communication électrique ne puisse s'établir entre le liquide et le vase.

Si, abordant la question indirectement, nous l'envisageons à un point de vue purement théorique, elle nous semble se décider dans le sens que nous indiquons.

En effet, par l'examen attentif des diverses circonstances de l'évaporation on est amené à se demander si durant la condensation, une partie de la force vive calorifique ne se transformerait pas en mouvement intérieur de la masse aqueuse, puis celui-ci se distribuant inégalement autour des particules de vapeur et des gouttelettes liquides, il en résulterait une accumulation de mouvement moléculaire dans les couches superficielles? Assurément la formation de la moindre parcelle de cette poussière d'eau dont les nuages et les brouillards sont constitués, nécessite un nombre immense de molécules de vapeur; et la distribution de l'éther dans ces molécules doit être bien différente suivant qu'elles sont libres ou réunies; il n'y aurait donc aucune absurdité à penser que par ce seul fait la molécule d'eau puisse acquérir un état éthéré positif, relativement à celui qu'elle avait auparavant.

Indépendance de cette théorie de celle de l'éther.

Il faut cependant remarquer que les explications précédentes et l'hypothèse de l'éther n'ont aucun rapport nécessaire. En effet, supposons que le milieu éthéré n'existe pas, rien ne nous empêche d'admettre que cette force vive de la matière pesante qui, selon toute école, constitue le calorique puisse se transformer dans la force vive d'expansion et de raréfaction qui constitue l'électricité. La conversion de l'électricité en calorique et du calorique en électricité n'est pas une absurdité, dès que ces agents ne sont pas des fluides, mais de simples modes de mouvement, quelle que soit du reste la matière en mouvement qu'elle soit pondérable ou impondérable. Donc regarder l'électricité atmosphérique comme de la chaleur transformée, c'est en donner une explication rationnelle, et conforme aux idées que nous nous faisons aujourd'hui des forces de la nature : et si les résultats fournis par l'observation laissent encore à désirer, le principe théorique n'a rien à redouter des incertitudes de l'expérience.

La distribution de l'électricité dans l'atmosphère est telle que tout conducteur élevé à une certaine hauteur accuse un état posi-

tif, relativement à celui qu'il présentait un peu plus bas, et devient négatif en descendant vers le sol. On s'explique ainsi pourquoi la pluie est ordinairement négative. Quelques physiciens ont déduit de là que le globe terrestre est négatif de sa nature, tandis que toute l'atmosphère et les espaces célestes sont positifs. Une pareille conclusion nous semble peu rigoureuse. En effet, tout s'explique en admettant que les vapeurs répandues dans l'air lui communiquent une charge positive jusqu'à une certaine hauteur qui nous est inconnue. Quant à l'espace interplanétaire, il n'est nullement prouvé qu'il soit électrisé; enfin l'état négatif de la terre pourrait bien résulter de l'induction exercée par la charge atmosphérique. Nous ne disons rien des phénomènes produits par les coups de foudre, car ils ne font que reproduire dans une proportion gigantesque les effets de nos batteries, et ceux-ci ont été étudiés soigneusement.

CHAPITRE XIV

DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS ÉLECTRO-DYNAMIQUES. DES ACTIONS MAGNÉTIQUES.

Le magnétisme réduit à l'électricité.

Le magnétisme a vivement excité la curiosité des observateurs. On le regardait comme un des mystères les plus impénétrables de la nature, et l'on croyait la force dont il est la manifestation sans analogie avec les autres forces connues. Lorsque le génie expérimental eut banni des écoles les discussions inutiles, et que la philosophie naturelle s'engagea dans la voie de l'expérience et de l'observation, le magnétisme attira l'attention des physiciens d'une façon toute spéciale. La science s'enrichit d'observations nouvelles, les lois des phénomènes furent découvertes, mais leur cause première resta toujours inconnue dans son essence. Jusqu'à ces derniers temps les physiciens rapprochaient le magnétisme de l'électricité, bien plutôt parce qu'ils avaient remarqué certaines analogies dans les apparences des deux ordres de phénomènes, que parce qu'ils étaient parvenus à les rattacher à une même cause. Il était réservé à notre siècle de faire connaître une nouvelle moda-

lité de l'électricité, grâce à laquelle la connexion des deux agents se trouve nettement indiquée. Dès lors, la réduction de l'électricité et du magnétisme à un principe unique ne fut plus une simple hypothèse, mais une conséquence rigoureuse de l'analyse mathématique. Ainsi les actions magnétiques sont devenues un cas particulier des actions électro-dynamiques et nous ne devons pas séparer leur étude.

Exclusivité du magnétisme.

1° Ce qui frappe à première vue dans les phénomènes produits par les aimants c'est l'exclusivité de la vertu magnétique. Elle est propre à un petit nombre de substances seulement et même à proprement dire à une seule, le fer. Depuis la découverte d'Ampère, ce prétendu caractère spécifique n'a plus aucune valeur, on sait que les substances les plus diverses deviennent des aimants aussitôt que l'on détermine autour de leur masse une circulation convenable d'électricité.

Transmission du magnétisme.

2° Une seconde particularité semble séparer d'une manière absolue le magnétisme de l'électricité. L'aimant exerce son action à travers toutes les substances indistinctement, ce qui n'a pas lieu pour l'électricité statique ni pour les radiations ; sous ce rapport, l'action magnétique se rapproche de celle de la gravité. Les seules substances qui offrent une résistance à la force magnétique sont celles susceptibles d'être aimantées, et les corps conducteurs dans l'intérieur desquels le mouvement fait naître des courants induits. Ainsi la transmissibilité du magnétisme n'est pas exactement semblable à celle de la gravité, puisque certaines substances résistent à l'influence des aimants tandis qu'il n'en est jamais ainsi pour l'attraction universelle.

Polarité.

3° Les actions magnétiques et les forces électro-dynamiques présentent encore une propriété qui leur est spéciale, c'est la polarité — autrement dit *la faculté d'exercer des actions égales et opposées aux deux extrémités d'une ligne*. Ce mot polarité est d'un emploi fréquent en physique, il revient à l'occasion des phénomènes les plus divers, et malheureusement on ne l'emploie pas toujours pour indiquer une modification constamment la même.

Nombreuses significations du mot polarité.

Ainsi, dans la polarisation de la lumière, tout se réduit à *une direction des vibrations dans un même plan*. Certains chimistes nomment polarité l'état particulier dans lequel se trouve un

liquide décomposé par voie électrolytique. Suivant eux, dans une dissolution aqueuse quelconque traversée par un courant, l'hydrogène de toutes les molécules se trouverait électrisé en plus, et l'oxygène en moins, le passage du courant se faisant par une série de décompositions successives. Dans les piles la polarisation consiste tout simplement en une couche de produit chimique précipité sur les plaques et n'a rien à faire avec la polarité magnétique. Bizio (voy. p. 442) entend par polarité une orientation matérielle des centres de gravité produite par le courant, laquelle serait essentiellement différente de la polarité magnétique. Enfin on parle souvent de la polarité électro-statique, telle que celle des cristaux thermo-électriques; cette polarité se distingue de celle des aimants en ce que la charge des premiers réside à leur surface, tandis que dans les seconds elle se trouve à l'intérieur de chacune des molécules; en effet, tandis que les cristaux électrisés mis en contact avec un corps conducteur peuvent lui communiquer l'électricité de leur charge, dans les mêmes conditions les aimants ne perdent rien de leur force. Dans les deux cas les phénomènes sont moléculaires, et lorsqu'on brise un aimant, les fragments conservent les pôles dans la direction de ceux que présentait la masse entière avant sa division. Par exemple, si on casse l'extrémité d'un barreau aimanté rectangulaire AB (fig. 56) de manière à en détacher un morceau *mn* de même base que le barreau, mais dont la moindre dimension corresponde à la longueur de la barre; on obtient ainsi un nouvel aimant dont les pôles sont disposés dans le sens de la moindre dimension CB. A la vérité, cette polarité se détruit avec le temps, mais enfin elle dure assez longtemps. Enfin, quelques physiciens ont désigné sous le nom de polarité l'état des conducteurs d'une machine électrique à disque, mais c'est donner à ce mot une extension abusive.

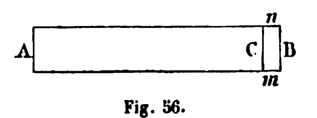


Fig. 56.

Hypothèses sur la polarité magnétique.

Grove compare la polarité magnétique à la direction que prennent un certain nombre de girouettes, lorsque le vent venant à souffler d'un point déterminé de l'espace les dispose toutes parallèlement les unes aux autres; puis il ajoute que si le vent vient à cesser elles reprendront leurs positions primitives ou conserveront

leur orientation suivant qu'elles sont ou non en équilibre indifférent. Mais cette comparaison qui rappelle assez bien les idées de Bizio sur la polarité, n'explique en rien l'action que ces girouettes exerceront sur leurs voisines pour les disposer parallèlement à leur propre direction, à moins que l'on n'imagine en chacune d'elles, deux centres d'action opérant à distance et dont les signes soient contraires. C'est là précisément l'idée fondamentale de l'ancienne théorie d'après laquelle chaque molécule possédait du fluide austral et du fluide boréal. La découverte d'Œrsted le conduisit, comme nous l'avons dit, à attribuer aux conducteurs une polarité transversale, hypothèse reprise par Cantoni, mais les travaux analytiques d'Ampère et les phénomènes de rotations électromagnétiques ont démontré le peu de fondement d'une semblable doctrine.

Opinion d'Ampère.

« L'impossibilité, dit Ampère, d'imiter avec des aimants seulement, de quelque manière qu'on les dispose, le mouvement continue, toujours dans le même sens, qu'offrent les circuits voltaïques non fermés, soit sous l'influence d'un circuit fermé, soit sous celle d'un aimant ou du globe terrestre; mouvement qu'on ne peut produire avec les circuits fermés, les seuls que ma théorie assimile aux aimants; cette impossibilité, dis-je, prouve directement ce que je cherchais à établir dans cette discussion sur des preuves complètes et indirectes, savoir : que quoiqu'on puisse rendre raison de tous les phénomènes que présentent les aimants, en y admettant les courants transversaux formant autour de leurs particules des courants fermés, on ne peut pas expliquer tous ceux qu'offrent les fils conducteurs en y admettant une aimantation transversale, et qu'ainsi l'hypothèse de ces physiciens ne saurait être admise[1].

La polarité ampérienne se distingue de tout cela : elle considère chaque molécule comme un tore tournant, un gyroscope, ou autrement un petit tourbillon ou courant moléculaire fermé. Elle satisfait ainsi rigoureusement à la condition d'une action égale et opposée aux deux extrémités de l'axe, et est capable d'une action sur le milieu environnant, comme nous verrons tout à l'heure.

[1] Ampère, *Recueil d'observations électro-dynamiques*, p. 253.

Ampère s'occupe tout d'abord de savoir si les courants moléculaires des aimants se créent de toutes pièces dans les substances magnétiques, pendant l'aimantation, ou bien si la cause qui aimante ne fait que déterminer une circulation de courants préexistant dans les métaux à l'état naturel[1].

Liaison du magnétisme avec l'état moléculaire.

Il se décide en faveur de la dernière opinion, à cause de plusieurs raisons et en particulier de cette considération que l'aimantation ne saurait changer la température du morceau de fer qui l'éprouve, d'où il résulte que les circuits magnétiques ne peuvent être constitués autrement que par les circulations intérieures qui, dans tous les corps, accompagnent l'existence de la chaleur. L'expérience a prouvé qu'une série d'aimantations et des aimantations échauffent les barres, ce qui prouve que la chaleur n'est pas étrangère à ces mouvements moléculaires. Mais cette chaleur est hors de proportion avec la température absolue du corps magnétique. Elle est simplement un effet d'induction. Il faut ici distinguer les groupes moléculaires des simples molécules, parce que le vrai magnétisme polaire est propre seulement aux substances solides; et bien qu'une certaine forme de magnétisme ait été découverte dans quelques liquides et dans un petit nombre de gaz, une polarité permanente n'y a été jamais démontrée, et les effets obtenus paraissent dépendre plutôt d'une propriété contraire, le diamagnétisme, dont nous allons parler un peu plus loin, que du véritable magnétisme propre aux masses de fer. Un fait certain, c'est que les substances magnétiques par excellence perdent, autant qu'on peut le reconnaître par les moyens ordinaires, leur vertu par la fusion. Matteucci l'a démontré en expérimentant sur le fer; d'où l'on croit que la qualité magnétique résulte surtout de l'état d'agrégation des molécules constitutives du solide.

L'hypothèse d'Ampère assimilant les propriétés des aimants à celles des courants, les premières seront expliquées dès que nous aurons trouvé une interprétation satisfaisante des secondes. Or, pour faire comprendre les phénomènes électro-dynamiques, il suffit de donner la raison physique de la formule établie par Ampère,

[1] *Ibid.*, p. 181.

car elle renferme en principe tous les cas imaginables : de sorte qu'ayant trouvé le principe physique sur lequel repose cette formule, l'intelligence de tous les autres faits deviendra facile. C'est là, du reste, le grand avantage du calcul : il réduit les observations les plus complexes à quelques faits élémentaires fort simples ; de telle sorte que ceux-ci une fois expliqués, les autres le sont du même coup, car ils découlent des premiers comme autant de corollaires nécessaires.

Forces ampériennes.

La formule en question suppose deux forces existant dans les circuits électro-dynamiques, savoir : 1° une action en raison inverse du carré de la distance agissant tantôt comme attraction, tantôt comme répulsion suivant le sens des courants ; 2° une fonction de la direction du mouvement du courant, qui fournit une résultante facile à déterminer d'après les règles de la composition des forces statiques ordinaires.

Les considérations tirées des mouvements qui peuvent avoir lieu dans un fluide conduisent facilement à donner la raison de ces deux éléments; toutefois Ampère, afin de rendre les principes sur lesquels il fondait son analyse indépendante de toute idée théorique, aima mieux les regarder comme données expérimentales. Quant à nous, nous devons suivre une marche différente, et arriver par la théorie à démontrer les faits fondamentaux admis par Ampère[1].

Analogie avec les fluides ordinaires.

Faisons remarquer tout d'abord que, même dans les fluides ordinaires, il se produit fréquemment des mouvements d'éloignement et de rapprochement qui nous sembleraient des attractions et des répulsions véritables si le milieu dans lesquels ils se développent échappait à nos sens. En général, la mécanique des liquides n'est pas différente de celle des solides en la regardant par rapport à leurs molécules individuelles : les chocs de celles-ci doivent être sujets aux mêmes lois de statique que le choc des corps de forme invariable : ainsi donc il doit avoir lieu une variation de direction pour les rencontres qui s'effectuent d'une manière ou de l'autre. C'est en conséquence de ce principe que nous voyons des veines de directions opposée qui viennent à

[1] Ampère, *Recueil*, etc., p. 215.

se heurter changer de direction et suivre la résultante des deux impulsions primitives? De même, un vent violent dévie un jet d'eau et le déplace dans le sens de sa propre direction, et réciproquement, un jet d'eau communique un mouvement d'ascension à la masse d'air environnante. En dirigeant un courant d'air à une petite distance d'une flamme, et parallèlement à sa direction, la flamme se dirige vers le point d'où l'air souffle, il y a en quelque sorte une attraction : dans le cas où le flux atmosphérique se fait en sens contraire du mouvement ascensionnel de l'air chaud, il y a éloignement ou répulsion[1]. Rappelons enfin les phénomènes d'aspiration qui accompagnent l'écoulement des liquides, et dont nous avons parlé assez ci-dessus : à tout ce que nous avons dit alors, comme exemple d'attraction apparente, on peut ajouter le fait très-connu d'une mince rondelle plate, de papier, par exemple, qui est attirée contre une paroi plane dans laquelle se trouve une ouverture laissant échapper un jet d'air comprimé[2].

Diminution de pression produite par les fluides en mouvement.

En examinant les choses au point de vue purement théorique, on peut dire que toute masse fluide qui se met en mouvement relatif par rapport aux objets circonvoisins détermine nécessairement dans le milieu ambiant une diminution de pression tout autour d'elle. Cela est une conséquence du principe de continuité, c'est-à-dire de ce fait fondamental que dans l'écoulement d'un liquide la section de la masse en mouvement est inversement proportionnelle à la vitesse. Par conséquent toutes les fois que dans une masse de fluide un mouvement prend naissance suivant une direction donnée, la section de la masse qui s'écoule deviendra plus petite, et par là il se formera dans le milieu environnant un vide ou tout au moins une diminution de pression. Il s'ensuivra donc comme effet corrélatif une rupture d'équilibre, non-seulement dans le fluide lui-même, mais encore par l'intermédiaire de celui-ci dans les masses pondérables au milieu desquelles il coule. Ainsi lorsque le tuyau de décharge d'un réservoir plein d'eau est à parois flexibles, il éprouve une compression de dehors en dedans pendant l'écoulement, par suite de la diminution de

[1] Ce phénomène s'observe facilement avec la flamme fuligineuse de l'essence de térébenthine.

[2] Nous avons, dans le chapitre VIII, exposé plusieurs phénomènes qui démontrent la modification de l'espèce autour des aimants, et nous y renvoyons le lecteur.

pression. Concluons donc que les *attractions et les répulsions électro-dynamiques peuvent résulter simplement des actions mécaniques d'un fluide.* A la rigueur, nous pourrions nous contenter de reconnaître que rien ne s'oppose à accepter cette manière de voir, en attendant que des études théoriques ultérieures sur les fluides et la découverte de nouveaux faits expérimentaux viennent jeter une lumière plus vive sur ce sujet ; cependant il ne sera pas mauvais de préciser ces indications générales.

Sans doute nous rencontrons une sérieuse difficulté à expliquer comment s'exerce à distance l'action des courants, que nous comprenons facilement lorsqu'il y a contact. Aussi est-il nécessaire de déterminer quelle peut être la modification qui a lieu dans l'éther environnant, par lequel se transmet l'action d'un point à un autre. En un mot, essayons de combler la lacune qui est inévitable lorsqu'on n'admet pas l'action *à distance*.

Modification de l'éther autour des aimants.

Les faits de l'induction dynamique nous ont prouvé que durant le passage continu du courant dans un conducteur, l'éther environnant est profondément modifié tout autour de ce même conducteur [1]. Cette modification est toujours faible quelque puissants que soient les courants employés, cependant elle peut être reconnue plus aisément à l'aide des aimants très-énergiques résultant de l'influence du courant électrique sur le fer doux. Alors les effets sont notablement renforcés, et comme ils ne diffèrent en rien de ceux obtenus avec les courants seuls, il est préférable de les prendre comme sujets d'étude. Parmi les faits nombreux propres à mettre en évidence les changements qui surviennent dans l'éther autour d'un conducteur traversé par le courant, nous rappellerons l'énorme résistance qu'on éprouve à entretenir la rotation d'un disque de cuivre entre les pôles d'un électro-aimant, la violence du bruit que fait l'étincelle électrique, jaillissant entre ces pôles, comment enfin un cube de cuivre animé d'une rotation rapide et placé sur la ligne polaire d'un électro-aimant, s'arrête lorsqu'on lance le courant dans le fil ; tous ces faits nous prouvent qu'il y a là une force, c'est-à-dire une modification profonde

[1] Voyez les idées d'Ampère sur ce point dans *Recueil*, etc , (p. 214), et Felici, *Memoria sulla induzione* (*Annales de l'Université toscane*, vol. III, p. 9), et Blaserna, mémoire déjà cité.

de l'éther extérieur. Mais la permanence de cette force est mise en pleine lumière par une remarquable découverte de Faraday, la déviation du plan de polarisation d'un rayon transmis par les substances diaphanes lorsqu'elles sont placées entre les pôles des aimants ; le plan tourne dans le sens des courants ampériens que l'on pourrait concevoir dans la substance diaphane, si elle était un morceau de fer doux.

Modifications révélées par l'optique.

Nous étudierons plus loin les diverses particularités de ce phénomène ; ici nous en déduirons seulement que dans les milieux répandus autour des aimants l'éther est profondément modifié, et que le mouvement circulaire imaginé par Ampère dans les aimants est fort probable. Jusqu'à présent les déviations du plan de polarisation n'ont pu être obtenues que dans les milieux pondérables, de telle sorte que nous ne pouvons rien en déduire relativement aux changements qui peuvent avoir lieu dans le vide ; mais M. de la Rive vient de démontrer que ces effets sont proportionnels à la densité des masses employées, d'où résulte que dans les corps d'une faible densité les effets peuvent ne pas être sensibles. Toutefois, considérant les analogies du vide et des diaphanes, on est porté à croire que les mêmes mouvements existent aussi dans le vide. Les mouvements circulaires dont la lumière nous révèle l'existence au sein des isolants sont du genre de ceux que depuis longtemps on sait produire avec les conducteurs soumis à l'action des courants et des aimants : par exemple, la rotation du mercure et des liquides répandus à sa surface.

Il y a plusieurs circonstances essentielles à considérer dans l'éther qui environne un aimant ou le conducteur du courant.

Description de cette modification.

1° Lorsque le courant envahit un conducteur, il se forme autour du filet central, parallèlement à sa direction, un véritable flux, à peu près comme nous voyons le long des rives d'un fleuve se développer des remous sur une étendue déterminée ; ou bien encore une circulation s'établit suivant des orbites infiniment petites, toutes les fois que ce mouvement n'est pas rendu impossible par la difficulté que l'éther rencontre à se mouvoir dans l'intérieur de certaines substances. Dans ce dernier cas la communication du mouvement doit être comparée à celle qui détermine la résonnance de la colonne gazeuse renfermée dans un tube sur l'orifice duquel on di-

Mouvements orbitaires.

rige normalement un courant d'air; en effet, les molécules aériennes tournent alors suivant des courbes fermées, dont l'amplitude égale celle de l'oscillation des mêmes molécules à l'intérieur de l'onde sonore, c'est-à-dire une fraction très-petite de la longueur d'onde. Évidemment l'un des deux mouvements se produit de préférence à l'autre, selon la nature du corps : ainsi aux conducteurs convient le premier genre de mouvement, aux isolants et au vide le second.

Si on cherche quelle sera la résultante des actions d'un espace ainsi modifié par les petits tourbillons, on pourra recourir au principe établi par Ampère pour les aimants : c'est-à-dire que pour une surface à une distance donnée, la résultante est comparable à celle que produirait un mouvement général, en courants finis. Pour ce qui regarde cette résultante finale des actions à distance, on pourra donc faire abstraction des tourbillons élémentaires et considérer le milieu comme parcouru par un courant indéfini. Nous en verrons bientôt l'application.

Diminution de pression.

2° Outre le mouvement orbitaire qui prend naissance dans le milieu, il faut aussi considérer la diminution de pression que produit autour du fil la vitesse du courant, comme nous l'avons reconnu en parlant de l'induction. Par conséquent, lorsqu'il s'agit d'expliquer les actions électro-dynamiques, on doit combiner les actions rotatoires avec cette seconde force, considération qui avait échappé à Ampère.

3° Il est nécessaire de ne pas perdre de vue le point fondamental suivant : ce que nous nommons courant n'est réellement qu'une succession de molécules qui s'avancent comme autant de projectiles animés d'une vitesse commune; il en résulte que les règles de la composition des forces de projection se doivent appliquer en réalité à chacun des éléments en particulier et non à cet ensemble idéal que nous nommons courant. Cette réflexion extrêmement simple nous apprend que les résultantes de ces mouvements se trouveront d'après les règles ordinaires de la composition des forces statiques, et nous comprenons comment Ampère a pu poser en principe fondamental que les éléments infiniment petits de courant (autrement dit les molécules dont nous parlions tout à l'heure) agissent les uns sur les autres conformément aux principes

de la composition des forces. Pour en déduire la composition des courants angulaires, et leur tendance au parallélisme, il suffit de supposer que les divers éléments ou les molécules qui les composent sont capables de rotation; car, sans cette rotation, l'explication complète de la tendance au parallélisme est impossible.

Concluons donc que la vitesse d'un courant étant considérable, la pression latérale ne demeure pas la même dans tous les sens; d'où résulte la production de mouvements à distance et d'un mouvement tourbillonnaire dans le milieu ambiant. Ce tourbillon prend naissance de la manière suivante : le filet central ayant une vitesse relative plus grande que les couches voisines, chaque molécule se trouve par là soumise à l'action d'un couple, elle prend un mouvement de rotation et se trouve entraînée dans le milieu où règne la plus grande vitesse, et là le couple cesse d'exister. Rappelons à ce propos une observation que chacun peut faire et qui se trouve ici parfaitement à sa place. Dans les cours d'eau toutes les substances dont la densité est moindre que celle de l'eau et qui flottent à la surface, se réunissent vers le milieu, là où la vitesse a un maximum et la pression un minimum; les flotteurs qui sont hors du filet central ont un mouvement continuel de rotation, produit manifestement par la vitesse variable que possède le courant dans les parties éloignées du milieu, et qui forme un couple moteur.

La diminution de pression qui accompagne tous les flux suffit à déterminer une attraction entre les deux conducteurs traversés par un courant, pendant que la rotation influe sur le sens angulaire suivant lequel doit se placer le conducteur mobile sous l'influence du conducteur fixe. Dans une rivière ordinaire nous voyons les effets de cette diminution de pression, car nous voyons le milieu plus élevé que les bords; et cela par la diminution de pression due à la vitesse : de sorte que, dans les flux liquides, on observe nombre d'éléments analogues à ceux que nous admettons pour l'éther.

Action des courants parallèles et en même sens.

Cela posé, examinons le cas de deux courants séparés par un milieu isolant; car lorsque deux conducteurs communiquent ensemble métalliquement, ils n'en forment qu'un seul.

Concevons (fig. 57) deux conducteurs AB, MN, animés par des

courants parallèles et de même sens : deux actions bien distinctes se développeront autour d'eux.

1° Une diminution de pression qui obligera l'éther environnant à se rapprocher des conducteurs, et, comme dans les fluides, le filet du milieu est toujours celui dont la vitesse est la plus grande, le mouvement latéral dont nous parlons commencera dans le conducteur lui-même et se propagera de proche en proche au milieu ambiant. L'action s'exercera encore à la fois sur les parties H et K, situées en dehors, et sur celles PQ, comprises entre ces mêmes conducteurs. Dans l'intervalle interposé, l'aspiration intérieure surpassera celle qu'ils exercent sur les corps extérieurs, et les conducteurs seront poussés l'un contre l'autre. Pour ce qui regarde les rotations moléculaires ici, elles ont une circulation opposée selon qu'elles proviennent de l'une ou de l'autre ligne du courant, et tirant un plan diviseur PQ, on trouvera à cette limite la répétition de l'effet des deux axes principaux, qui étant concordants, ne sauraient se contrarier.

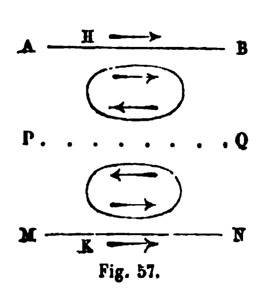


Fig. 57.

Actions des courants opposés

Supposons maintenant les deux fils AB, MN (fig. 58) parcourus en sens contraire. La diminution de pression subsistera encore, mais les courants élémentaires en un plan diviseur PQ quelconque agissant en sens contraire, répéteront les forces opposées de collision des axes principaux, et il en résultera une tendance à s'éloigner. Malgré l'effet de l'aspiration intermédiaire, les conducteurs s'éloigneront, l'aspiration étant contre-balancée par le choc contraire des rotations opposées. Donc si toute rotation est empêchée, comme cela arrive avec certaines combinaisons de conducteurs, on obtiendra seulement un éloignement et une répulsion.

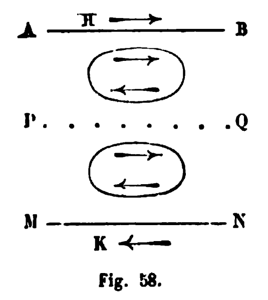


Fig. 58.

L'intensité de cette répulsion dépend de la vitesse moléculaire considérée par rapport à celle de la vitesse absolue, et l'expérience prouve que l'une est capable de vaincre l'autre.

Lorsque les conducteurs sont susceptibles de mouvement angulaire, les mouvements gyratoires auront lieu, et alors le résultat se réduit aux influences d'un mouvement rotatoire sur un autre, lesquels, d'après les lois statiques de la composition des forces, doivent se réduire au parallélisme; par conséquent, dans le cas où la mobilité du fil est suffisante, il tournera sur lui-même et deviendra parallèle à l'autre. Ainsi la composition de ces courants élémentaires revient à celle des rotations ordinaires qui, en dernier analyse, dépendent de la composition statique des forces appliquées aux points de chacun des corps tournants. **Courants d'angle.**

On voit ainsi qu'Ampère, prenant toujours la composition de forces statiques comme point de départ de la théorie qui lui a permis de relier les nombreux phénomènes électro-dynamiques, a basé ses formules sur un principe que l'on peut regarder comme une conséquence du mouvement mécanique des fluides combinés avec les actions latérales. Et comme ces actions décroissent à mesure qu'augmente la masse qui doit être mise en mouvement, et celle ci, pour toutes les actions que l'on suppose émanées d'un centre unique, croissant comme le carré des distances, de même ces actions, considérées dans leurs éléments, ne devront pas s'éloigner de cette grande loi naturelle.

La force avec laquelle réagissent l'un sur l'autre deux conducteurs finis quelconques, ou deux conducteurs hélicoïdaux nommés solénoïdes, ou deux aimants, n'étant qu'un cas particulier du principe sur lequel repose la formule fondamentale, se trouve ramenée à n'être qu'une conséquence naturelle du mouvement mécanique de l'éther, et comme les aimants ne sont que des assemblages de courants pareils aux solénoïdes, ainsi leurs attractions et répulsions sont expliquées par les mêmes principes.

Le coefficient de la valeur mécanique absolue de cette force a été déterminé par Cazin; il a trouvé que l'action d'un courant capable de décomposer un équivalent d'eau, soit 9 milligrammes en une seconde, est telle que, concentrée sur un conducteur linéaire d'un mètre de long et agissant à une distance d'un mètre, elle est égale à 188 milligrammes[1].

[1] Voy. Moigno, *Mondes, science pure,* 1863, p. 307.

CHAPITRE XV

SUITE DU MAGNÉTISME. — MAGNÉTISME TERRESTRE.

Intensité magnétique de la terre.

Les considérations précédentes suffisent à expliquer les réactions mutuelles des aimants, mais à cause de la très-grande importance du magnétisme comme force naturelle, nous devons présenter encore quelques réflexions relatives à sa manière d'agir et aux circonstances qui l'accompagnent.

La terre, comme on le sait, est en réalité un vaste aimant d'une puissance énorme, que Gauss évalue celle de 8,464 trillions de barres d'acier pesant chacune une livre et aimantées à saturation[1], ce qui porte que chaque mètre cube du globe terrestre a un mouvement magnétique égal presque à celui de 8 de barres pareilles. A cause de l'action de cet aimant immense sur l'éther, le globe terrestre est enveloppé par un de ces tourbillons, dont nous avons parlé, qui l'accompagne dans sa course à travers l'espace, soit parce que notre planète entraîne avec elle une partie de l'éther environnant, soit parce que ce tourbillon se forme successivement aux divers points de la trajectoire terrestre. Ce tourbillon peut être formé soit par un véritable courant de transport, soit par des rotations ou tourbillons infiniment petits dont la résultante est équivalente au grand tourbillon fini, comme nous venons de dire dans le chapitre précédent. L'intensité magnétique du tourbillon terrestre est tellement énergique que nos aimants artificiels, qui, pour de faibles distances, lui résistent efficacement, deviennent promptement incapables de l'équilibrer. Elle pénètre les enveloppes de fer, comme nous le voyons dans les bâtiments blindés, dont les énormes masses métalliques dévient la résultante terrestre à peine de quelques degrés. Nobili comparait les tourbillons des aimants ordinaires aux nœuds du bois qui dévient les fibres ligneuses de leur direction naturelle seulement dans un espace assez reserré autour du point qu'ils occupent. Cela provient de l'énorme disproportion des masses aimantées.

[1] Gauss, *General theory of terr. magn.*, n° 31.

Avant les découvertes d'Ampère, on ne savait comment expliquer l'existence d'une intensité magnétique aussi considérable, dans un corps renfermant en définitive une quantité relativement minime de matières réellement magnétiques. On invoquait des aimants intérieurs, mais cette hypothèse inconciliable avec la haute température du centre du globe, se trouvait encore insuffisante à expliquer les lois de la distribution du magnétisme à la surface terrestre. Ampère montra comment un corps, en l'absence de toute matière de nature ferrugineuse, pouvait acquérir une puissance magnétique énergique par le seul fait de l'établissement d'une circulation électrique autour de sa surface, quelle que fût d'ailleurs la cause de ce mouvement. Mais rien ne dit que le courant éthéré qui, enveloppant notre globe, détermine les effets de magnétisme terrestre, soit le plus intense de ceux qui peuvent exister dans l'espace; il est donc rationnel d'admettre que ce tourbillon magnétique est constitué seulement par une fort petite portion de l'éther au milieu duquel flotte la terre; et nous ne sommes pas en mesure d'assigner quelle est son action maximum. **Origine de ce magnétisme.**

Quelque savant a comparé la transmission de la force magnétique à celle de la lumière; mais il nous paraît qu'il y a une différence essentielle. La lumière est une vibration et demande un travail continu qui épuise ce corps lumineux afin d'être entretenue. Un aimant ne s'épuise pas. C'est une tension diffuse dans le milieu plutôt qu'un véritable travail. Une telle tension ne fera un travail que lorsqu'elle se produit dans l'espace la première fois, et lorsque le siége se déplace et va influencer des autres corps susceptibles d'offrir une résistance. L'éther seul résistera, sans doute, par son inertie à recevoir l'actuation magnétique, mais infiniment peu en comparaison de la matière pondérable. L'observation n'a pas encore prononcé sur la vitesse absolue avec laquelle la force magnétique se propage dans le vide. Nous pouvons cependant prendre pour sa mesure celle que Blaserna a trouvée pour l'induction, qui serait très-faible dans les corps solides isolants, et dans l'air se rapprocherait de la vitesse du son. Mais cela est une simple conjecture. Le fer emploie un temps très-appréciable pour acquérir leur magnétisme et pour le transmettre d'une section à l'autre. Dans l'espace, si cela se fait avec la vitesse de la lumière, il sera diffi- **Transmission du magnétisme.**

cile de pouvoir la mesurer. Les éruptions solaires qui paraissent agir sur le magnétisme terrestre, étudiées soigneusement pourront peut-être nous apprendre quelque chose.

Lignes de force magnétique. Une expérience vulgaire et très-connue donne une idée de la distribution de la force magnétique autour d'un aimant. On couvre de limaille de fer une feuille de papier posée sur un aimant : les parcelles métalliques se disposent en lignes courbes convergentes, dont les extrémités se réunissent au niveau du pôle. Ces courbes ont été nommées lignes de force magnétique, mais il importe de savoir qu'elles ne représentent nullement, ni la direction du courant à l'intérieur des tourbillons, ni les lignes de mouvement de l'éther, mais seulement la disposition des lignes le long desquelles la force résultante des deux actions polaires est d'une intensité et d'une direction déterminée. Ces lignes sont utiles à considérer lorsqu'il s'agit d'expliquer la perturbation que la présence d'un corps jette dans l'espace nommé champ magnétique. En outre, comme elles se forment à travers les corps isolants, on peut en conclure que l'action du tourbillon magnétique n'est pas une circulation plus ou moins étendue s'accomplissant dans l'espace ambiant, ainsi que cela se fait au sein des conducteurs mis en communication avec la pile voltaïque ; mais qu'elle consiste plutôt en une rotation suivant des orbites infiniment petites, dont l'effet résultant ne diffère pas, en définitive, de celui d'un mouvement circulatoire fini.

Force coercitive. Ce que nous nommons *force coercitive* dans les aimants, n'est autre que la propriété spéciale à certaines substances (l'acier surtout) de conserver orientés les mouvements circulaires intérieurs. Mais ici, comme dans tous les cas d'actions semblables, une telle orientation ne peut se réduire en activité sans un travail initial, lequel est évaluable en équivalents mécaniques. On peut le rendre sensible en le répétant plusieurs fois de suite, à quoi il est facile d'arriver à l'aide de substances dans lesquelles l'orientation n'est pas permanente, du fer doux, par exemple. Ainsi M. Soret, ouvrant et fermant alternativement le circuit d'un électro-aimant, de façon à aimanter et à désaimanter le fer doux, plusieurs fois de suite, a reconnu que la force du courant et la chaleur dégagée dans le circuit, subissaient une notable diminution. Lorsque

l'attraction exercée par un électro-aimant sur son contact est employée à produire un travail mécanique, cet effet s'obtient aux dépens de la chaleur du circuit. (Favre.) Le travail ne se fait qu'au commencement ; ensuite, la modification subsiste sans perte de force ; cela prouve encore que le magnétisme consiste dans une modification du milieu et non dans un travail comme la vibration. Ampère croyait que l'action magnétique ne consistait qu'à polariser, c'est-à-dire diriger tous les mouvements moléculaires caloriques dans un même sens, et nous croyons qu'il avait raison.

Dans l'aimentation par les procédés ordinaires de simple ou de double touche, le travail en question paraît se faire sans consommation de force vive ; bien plus, il semble que l'aimant engendre de lui-même une force dont on ne peut assigner l'origine en s'appuyant sur la grande loi de la constance de la force. Aussi bien des gens s'y sont trompés et ont cherché à tirer de là le moyen de réaliser le mouvement perpétuel. Un aimant en attirant le fer exécute un travail, en même temps il perd de son énergie sur les corps environnants de sorte que quand le fer s'attache à l'aimant, l'action exercée à distance par ce dernier sur d'autres morceaux de fer doux ne reste plus la même. L'aimant récupère toute sa force lorsqu'on le sépare du contact ; mais, pour y arriver, il faut dépenser un travail égal et contraire à celui fait par l'aimant au moment de l'attraction. Ici on voit manifestement que tout changement de distance entre les corps porte une variation du potentiel qui mesure leur puissance absolue[1]. **Travail dans l'aimantation.**

Semblable chose s'observe dans le problème inverse, c'est-à-dire quand, par une série d'aimantations et de désaimantations successives obtenues par voie mécanique, on produit un courant. Les machines électro-magnétiques d'induction comme celles de Wilde, de l'*Alliance*, construites pour obtenir de la lumière élec- **Travail d'induction magnétique.**

1. Sous le nom de potentiel les mathématiciens entendent la somme totale des éléments du corps, multiplié chacun par la variation élémentaire de la distance à un point, divisée par son carré $\int \frac{edr}{r^2}$, e étant l'intensité absolue de l'unité de force à l'unité de distance. Évidemment cet intégral est $= -\frac{e}{r}$; il dépend donc de la forme du corps et de la distance de tous ses éléments par rapport au point attiré. En général, on le considère comme une valeur qui mesure l'intensité de la force selon l'ancien langage.

trique au moyen de courants d'induction développés par des aimants, nous fournissent un exemple remarquable d'absorption de travail pendant une action magnétique. Quand la machine tourne à vide, c'est-à-dire lorsque les circuits sont ouverts, la force d'un homme suffit à mettre les disques en mouvement ; mais lorsque les circuits sont fermés et qu'elle donne naissance aux courants induits, la force de deux chevaux est nécessaire pour la maintenir en activité. Les données numériques fournies par cette machine ont permis de calculer l'équivalent mécanique de la chaleur, le magnétisme servant d'intermédiaire, et le résultat auquel on est arrivé est identique à celui de Joule. Ici se produit encore de la chaleur, comme dans l'expérience du disque de cuivre tournant entre les pôles d'un électro-aimant, ce qui nécessairement introduit dans les calculs des éléments étrangers dont il est difficile de tenir compte.

Il suit de là, Ampère en avait déjà fait la remarque, l'impossibilité de réaliser le mouvement perpétuel avec les aimants comme avec tous les impondérables. En effet, les aimants agissent comme des forces dirigées vers des centres fixes ; ils ne peuvent donc augmenter en rien la force vive, et il n'y a pas en eux une cause permanente qui excite incessamment un nouveau travail, comme est l'action chimique dans la pile.

Polarité mécanique.

On n'avait pas réussi jusqu'à ces années dernières à expliquer la théorie de la polarité magnétique à l'aide des principes de la mécanique ordinaire, aujourd'hui les études pratiques des phénomènes de rotation ont vivement éclairé la question. L'instrument nommé gyroscope donne une idée assez nette de la façon dont un simple mouvement mécanique, peut produire les phénomènes d'*orientation* que nous présentent les aimants. La règle que *les mouvements rotatoires tendent au parallélisme*, renfermant tous les cas de réactions réciproques entre les corps en rotation, résume en même temps la théorie des mouvements magnétiques. Les démonstrations, données par Ampère pour les aimants, sont encore applicables, comme on l'a montré depuis, aux masses métalliques qui, lorsqu'on les met en rotation par des moyens appropriés, nous présentent des manifestations qu'on pourrait dire *polaires*. Si bien qu'étant donné le principe des rotations

magnétiques, et leur appliquant la théorie très-simple des mouvements rotatoires, on pourrait remonter à l'action de deux courants rectilignes en suivant un ordre de raisonnement inverse de celui que nous avons tenu ci-dessus.

Tendance des rotations au parallélisme des axes.

Toutes ces vues théoriques deviendront parfaitement claires si nous nous arrêtons un instant sur les curieux phénomènes présentés par les corps en rotation. Soit (fig. 59) un tore A tournant autour d'un axe placé horizontalement dans une chape circulaire B. Cette chape est elle-même suspendue dans l'intérieur d'une

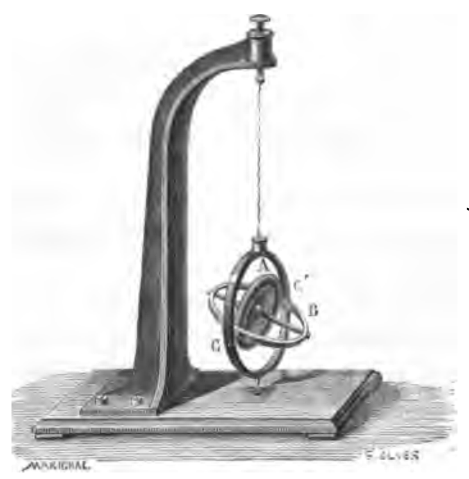


Fig. 59.

autre par des pointes C C′ qui lui permettent toute liberté de mouvement. Cette dernière est attachée à l'extrémité d'un cordon tordu sur lui-même. La torsion donne naissance à un couple qui tend à faire tourner le tore autour de la verticale passant par le fil de suspension ; mais le disque métallique n'obéit pas à cette force, tant que son axe, qui a été tout d'abord placé horizontalement, n'est pas devenu parallèle à la direction de l'axe de la rotation que tend à lui donner la torsion du fil. Par là nous voyons la chape extérieure qui porte le cercle intérieur rester d'abord immobile malgré la torsion, pendant que le cercle qui porte le tore se relève peu à peu par une des extrémités du diamètre correspondant à l'axe, jusqu'à devenir verticale et parallèle

à la direction de la corde : à ce moment, tout le système cède à la force de torsion et se met à tourner autour du fil comme axe. Une personne qui ignorerait les propriétés des corps tournants, et qui tiendrait un gyroscope dont la chape pût être saisie d'une seule main, constatant que la masse ne présente pas une égale mobilité dans les divers sens, se figurerait que quelque action mystérieuse sollicite le tore à prendre une direction fixe dans l'espace, de préférence à toute autre. Elle croirait, par exemple, que cet instrument tend vers le pôle de la sphère céleste, car on sait que le gyroscope s'oriente de la sorte si bien qu'il peut servir à indiquer la direction de l'axe terrestre.

Pour qui connaît la théorie des mouvements de rotation, le mystère s'explique aisément, car l'effet observé résulte de ce que la rotation de l'instrument tend à se mettre parallèle à la rotation terrestre.

Cette tendance, comme nous l'avons déjà dit, n'est pas due à quelque force mystérieuse, elle est simplement la résultante de la composition statique, des diverses forces impulsives dont les molécules sont animées chacune en particulier, avec les réactions engendrées par la force centrifuge et par la cohésion des parties du corps ; telles sont les composantes dont la combinaison donne lieu à ces mouvements singuliers qui, à première vue, semblent sans analogie avec tous ceux connus.

Transports dus à la même cause.

Nous citerons encore une expérience prouvant qu'un mouvement rotatoire donne naissance à une véritable translation, toutes les fois que de semblables déplacements sont nécessaires pour maintenir le parallélisme des axes. On prend (fig. 60) un tore en bronze tournant autour d'un axe placé dans une chape circulaire, dans laquelle est implantée une tige métallique. Supposons cette tige perpendiculairement placée relativement à l'axe de rotation du tore et fixée par sa partie supérieure à une pièce mobile autour d'un axe *ab*, faisant partie d'un support S placé sur une barre horizontale ou portant d'un appareil semblable à celui qui sert aux expériences sur la force centrifuge, le support S est installé de telle sorte que l'axe *ab* soit perpendiculaire au rayon du cercle décrit par le portant AB, si bien que le gyroscope peut osciller autour de *ab*, comme un pendule dans le plan du portant,

et par conséquent subir l'influence de la force centrifuge. Le tore mis en rotation, on fait tourner AB autour de CD. Voici ce que l'on observe. Pour un certain sens de la rotation du portant, le pendule gyroscopique s'écarte de sa position d'équilibre, en s'éloignant de l'axe CD, mais si l'on change le sens de la rotation du portant, on voit le pendule quitter la position verticale et se rapprocher de l'axe CD, malgré l'effet de la force centrifuge qui tend à l'éloigner du centre du mouvement. Dans le cas où le support S serait

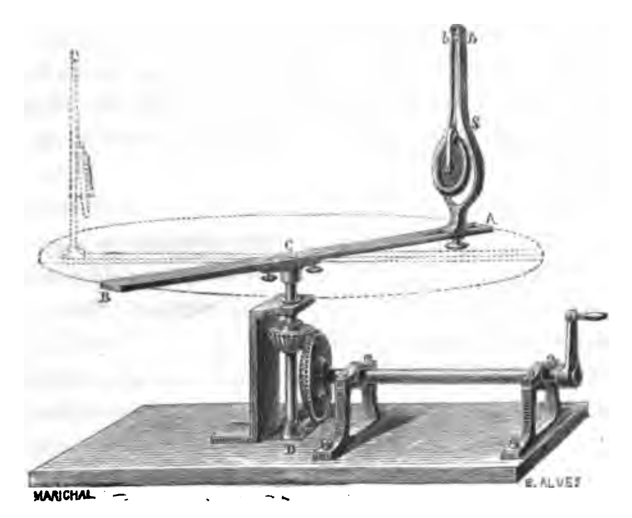


Fig. 69

installé sur le portant de façon à ce que le pendule gyroscopique puisse osciller dans un plan perpendiculairement au rayon du cercle décrit par AB, on verrait pendant la rotation de l'appareil quitter la verticale et s'incliner de façon à précéder le support S ou à rester en arrière suivant le sens de la rotation du portant.

Application aux aimants.

Les mouvements sur lesquels nous venons de dire quelques mots sont parfaitement semblables à ceux observés avec les aimants. Supposons des aimants fixés par leur centre de gravité, tout mouvement de translation étant impossible, ils se disposent de telle sorte que les rotations de leurs petits tourbillons moléculaires deviennent parallèles ; par conséquent, les pôles de même

nom se repoussent, car lorsqu'ils sont placés l'un en face de l'autre, leurs rotations se font en sens inverse; quant aux pôles contraires, ils s'attirent, parce que les rotations y sont de même sens. — Considérons maintenant les aimants mobiles dans toutes les directions, ils s'éloignent ou se rapprochent, ou, comme l'on dit, se repoussent ou s'attirent, suivant que l'un ou l'autre de ces mouvements les amène plus loin ou plus près du centre de mouvement, dans la position déterminée par la résultante des actions rotatoires. Le milieu qui sert à la transmission de ces mouvements de rotation est l'éther ambiant qui lui-même entre en rotation. Il se produit là quelque chose de comparable à ce qui a lieu lorsqu'un gyroscope étant plongé dans un liquide animé de rotation, la masse fluide force l'instrument à prendre une rotation parallèle à la sienne.

Autre comparaison. Pour nous former une image sensible de l'état intérieur des aimants, nous pouvons recourir à une représentations mécanique; imaginons un grand nombre de petites hélices ou de petits moulinets semblables à ceux qui servent de jouets aux enfants, adaptés à un même axe, autour duquel ils peuvent tourner avec une grande facilité; lorsque le vent vient à agir sur eux, ils prennent tous un mouvement de rotation dans le même sens : s'il a quelque moulinet ayant les ailes disposées en sens contraire des autres, il tournera en sens opposé.

Les expériences faites avec le gyroscope nous montrent donc que le principe de la composition des rotations explique non-seulement les mouvements d'*orientation* des aimants, mais aussi ceux de translation. En outre, pour comprendre exactement le mécanisme des mouvements de translation, on doit tenir compte du principe mécanique général de la diminution de pression, qui existe autour d'un centre de circulation, quel qu'il soit; ce qui détermine une véritable attraction, c'est-à-dire un rapprochement des parties. Ainsi l'hypothèse d'Ampère, regardée par certains comme la plus compliquée de toutes celles imaginées afin d'expliquer les phénomènes magnétiques, est au contraire la seule qui en donne une théorie fondée exclusivement sur les principes de la mécanique. Mieux encore, elle jette une grande lumière sur le principe général des attractions; car, ayant démontré que l'une

de ces actions résulte de mouvements mécaniques, on pourra toujours en dire autant des autres, quoique leur manière d'agir soit plus obscure.

Une difficulté se présente toutefois, spécieuse en apparence. Si le corps magnétique exerce une influence sur le milieu environnant, de quelque espèce qu'elle soit, c'est toujours un travail qu'il doit engendrer dans l'espace vers lequel il se transporte. Ce travail, pour faible qu'il soit, doit à la longue épuiser la force de translation d'un corps aimanté. Ainsi la terre devrait subir dans son orbite autour du soleil un retard, à cause de ce travail incessant qu'elle produit dans sa marche annuelle. Or, ce retard n'est constaté en rien, par conséquent on peut douter de cette prétendue modification. **Objection.**

Mais la réponse n'est pas difficile à donner. Si la terre doit exercer un travail en avant, elle laisserait un travail exécuté en arrière, ce travail ne peut s'anéantir. Ceci fera donc compensation au travail en avant. La manière dont s'accomplit cette compensation n'est pas difficile à comprendre dans un milieu élastique comme l'éther : l'impulsion première, qui constitue l'état magnétique, se transmettra par l'élasticité du milieu, et se conservera comme se transmet, se conserve toute impulsion d'ordre mécanique quelconque. **Réponse.**

Nous savons que l'une des propriétés les plus singulières du magnétisme est d'appartenir à un petit nombre de substances, et même, pratiquement parlant, à une seule substance, le fer. Mais si la théorie que nous développons est vraie, et si l'action magnétique consiste en une modification spéciale, produite dans la masse d'éther qui est dans l'intérieur de l'aimant et qui l'environne, comme cet éther se trouve aussi en mouvement dans tous les corps, évidemment l'action magnétique ne doit pas être complétement sans influence sur les autres substances, et l'on doit observer des phénomères différents selon que l'on considère l'un des deux cas suivants : **Exclusivité du magnétisme.**

1° Il peut se faire que les petits tourbillons moléculaires existant à l'intérieur des corps, soient déjà tous dirigés vers un même point, ou tout au moins faciles à s'orienter dans une direction commune.

Ou bien : 2° ils peuvent résister à l'orientation et être liés entre eux et avec les molécules autour desquelles ils circulent, au point de ne pas avoir une mobilité suffisante pour céder au tourbillon magnétique.

Magnétisme anormal.

Dans le premier cas, les courants moléculaires prendront la direction du tourbillon magnétique-lui-même, et le corps se dirigera de façon à ce que la ligne de leur somme maximum soit disposée suivant l'axe du tourbillon. Quelquefois cette ligne pourra ne pas coïncider avec la plus grande dimension du corps; ainsi en employant des artifices particuliers, il est possible d'aimanter un barreau rectangulaire d'acier, de manière à obtenir les pôles dans le sens de la largeur. Mais, même dans ce cas, la loi d'attraction reste la même, les mouvements rotatoires tendent au parallélisme : autrement dit, les pôles contraires se dirigent toujours l'un à une extrémité, l'autre à l'extrémité opposée. On observe un effet de cette espèce avec certaines pièces de laiton et de bronze contenant une minime quantité de fer (Pianciani), qui reçoivent la polarité dans le sens de leur épaisseur. Ces cas sont exceptionnels.

Corps magnétiques.

La liste des substances qui se comportent comme le fer est aujourd'hui assez étendue; elle ne comprend plus seulement le chrome, le nickel et le cobalt, mais des corps divers, entre autres le gaz indispensable à l'entretien de notre vie, l'oxygène [1],

Corps diamagnétiques.

Si la substance est constituée de façon à ne pas permettre un déplacement facile aux courants moléculaires, le corps n'échappera pas à cause de cela à l'influence du tourbillon magnétique, seulement son action sera contrariée; et son tourbillon moléculaire le disposera de telle sorte qu'il ait à éprouver la plus petite résistance, ce à quoi il arrivera en s'éloignant de la partie où l'action est la plus énergique; en d'autres termes nous obtiendrons une répulsion apparente. De pareils corps existent, on les a nommés *diamagnétiques* afin de les distinguer des autres, qui par Faraday avaient été appelés par opposition *paramagnétiques*, dénomination aujourd'hui abandonnée. Nous examinerons bientôt les propriétés de ces corps singuliers, pour le moment terminons

[1] Pour de plus amples renseignements, voir le *Traité sur l'induction* de Matteucci, et le *Traité d'électricité* de de la Rive, et l'excellent *Traité de physique* de Daguin.

ce chapitre en rappelant sommairement les faits qui démontrent la résistance exercée par ce tourbillon magnétique.

Nous avons déjà parlé de l'expérience du cube suspendu entre les pôles d'un puissant aimant, mais cette expérience demande quelque réflexion, et nous devons y revenir. On suspend, avec un cordonnet de soie, un petit cube de cuivre ayant environ 15 millimètres de côté; le fil, après avoir été fortement tordu suivant son axe, étant abandonné à lui-même, prend un rapide mouvement de rotation; quand la vitesse est à son maximum on lance un courant dans le fil des bobines, aussitôt le cube s'arrête et demeure immobile malgré la forte torsion du cordon. Le courant cessant dans l'électro-aimant, le cube recommence à tourner avec la même vitesse qu'auparavant; que l'on excite de nouveau l'aimant, le cube devient immobile, et plusieurs fois de suite cette admirable et curieuse expérience peut être répétée toujours avec le même succès. Résistance du tourbillon magnétique.

Or quelle puissance invisible arrête la masse métallique et l'empêche d'obéir à la rotation que tend à lui imprimer la force de torsion? Assurément c'est l'action du tourbillon magnétique, et comme l'expérience faite ici avec le cuivre réussit avec tous les autres métaux, à cette différence près que l'arrêt a lieu plus ou moins promptement suivant leur force conductrice, on peut dire que la résistance du champ magnétique se fait sentir à tous les corps.

Ordinairement ces résultats sont attribués aux courants d'induction, mais en analysant exactement les phénomènes on voit qu'une telle explication est insuffisante. A la vérité, ces courants se produisent dans la masse du cube, et si la substance était isolante et n'en admettait pas, les effets seraient insensibles; mais pourqu'ils se développent, il est nécessaire que le cube se meuve, et tant qu'il reste en repos le courant n'a pas lieu; donc, si le courant peut arrêter le cube, il est incapable de le maintenir immobile. En effet, l'arrêt du cube met fin à l'induction, tandis que la torsion du fil agit d'une manière continue sur le métal; par conséquent, si le courant induit était la cause efficiente, le mouvement du cube ne devrait pas cesser mais simplement éprouver un ralentissement jusqu'à ce qu'un équilibre fût établi entre la force de torsion et la réaction des courants induits. Or le cuivre reste immo- Exclusion de l'induction.

bile dans le champ magnétique; donc, il y a là un obstacle sans cesse renouvelé qui prend origine dans les pôles de l'aimant.

Tous ces faits nous paraissent très-simples à comprendre, lorsqu'on se laisse guider par les considérations développées dans les paragraphes précédents. Le cuivre n'appartient pas à la classe des corps qui permettent l'orientation de leurs courants moléculaires, et le tourbillon magnétique, en faisant irruption dans sa masse, se brise et se disperse; il en résulte un frottement qui arrête le mouvement du cube, aussi longtemps que durent l'état de circulation établie au sein de la masse métallique, l'influence du tourbillon magnétique et la torsion du fil. Faisons même remarquer que le courant d'induction qui dès l'abord s'établit dans le cube au moment de la fermeture du circuit voltaïque est dû, en définitive, à la même cause, c'est-à-dire à un reflux du fluide éthéré, forcé à prendre une nouvelle disposition à l'intérieur du corps, comme nous l'avons déjà dit en parlant de l'induction électrodynamique (chap. XI). Les corps isolants sont très-peu influencés par ce magnétisme dit de rotation ; la raison en est évidente : ils ne laissent pas pénétrer à l'intérieur de leur masse le mouvement du tourbillon lui-même, car ils n'admettent le mouvement longitudinal que d'une manière très-incomplète, comme nous le verrons tout à l'heure.

Autre exemple.

Le frottement du tourbillon magnétique sur une masse métallique animée de rotation, est rendu aussi palpable que possible par l'expérience du disque tournant entre les pôles d'un électro-aimant. Ici, c'est par l'intermédiaire du frottement de ce frein invisible que le travail mécanique se transforme en chaleur, et l'éther renfermé dans le métal agit à la façon d'un fluide ordinaire. Ne voit-on pas le mouvement d'une roue tournant au sein d'une masse liquide, être gêné par le milieu environnant, et une certaine force vive être alors absorbée et convertie en chaleur? (Joule.) Ce frottement virtuel engendre la vibration thermique des molécules, souvent à un degré suffisant pour fondre les alliages dont le point de liquéfaction est peu élevé. (Tyndall.)

Résistance de l'éther.

Ces faits mettent en évidence la résistance de l'éther au mouvement de la matière pondérable ; et, envisagés à un point de vue plus général, ils nous montrent combien il est inexact de

dire, comme on le fait bien souvent, que l'éther ne résiste pas, puisque ces phénomènes ont lieu dans le vide, là où on ne saurait imaginer autre chose que l'éther. Seulement, vu la subtilité et la mobilité extrêmes de ce fluide, il n'oppose de résistance sensible que lorsqu'il est animé d'une vitesse énorme, et surtout lorsqu'il est relié aux molécules pondérables, comme il arrive dans les expériences citées plus haut. On voit aisément quelles importantes conséquences on pourrait tirer de là relativement au mouvement des corps célestes. Mais poursuivons les recherches expérimentales.

CHAPITRE XVI

DIAMAGNÉTISME. — ACTION DU MAGNÉTISME SUR LES CORPS TRANSPARENTS.

Double condition de la matière.

Nous sommes en droit de conclure de la série très-étendue d'observations et d'expériences examinées jusqu'ici, que les phénomènes qui se manifestent dans les corps sont des affections particulières de la matière, envisagée sous deux états différents : l'un que nous nommons matière pondérable, et qui est sa forme grossière et composée ; l'autre, qui est un état d'atténuation et de subtilité extrêmes, qu'on nomme éther ou impondérable. Toutefois il nous est impossible de regarder l'éther comme élément chimique du corps ; cela ne pouvant se dire que des molécules pesantes qui forment partie invariable d'autres molécules pesantes de même genre.

Influence générale du magnétisme.

L'éther pénétrant tout, on était en droit de penser que tous les corps devaient être influencés plus ou moins par les aimants, parce que ceux-ci, donnant naissance à un tourbillon qui les enveloppe complétement, les divers corps plongés dans ce tourbillon en subissent nécessairement l'action. L'éther une fois admis, le magnétisme devenait une force universelle. Cette conséquence se trouvait étrangement contredite par le très-petit nombre des corps affectés par le magnétisme, de telle sorte qu'elle devenait une objection contre la théorie elle-même. Mais toute difficulté a disparu depuis les découvertes de Faraday. Ce physicien a prouvé que réel-

lement, tous les corps sont sujets à l'action magnétique, et cela indépendamment du fer qu'ils peuvent renfermer; bien plus, lorsqu'ils en contiennent, la manière dont se comporte ce métal est entièrement différente de celle que l'on connaissait depuis longtemps. Ainsi le magnétisme, qui donna à Kepler la première idée de la force régulatrice de l'univers, reprend dans la science le rang de force cosmique, et ces phénomènes si curieux et si inattendus, loin de jeter quelque trouble sur les idées théoriques exposées précédemment, viennent au contraire les confirmer d'une manière éclatante, comme nous allons le faire voir.

Caractères du magnétisme et du diamagnétisme.

Le caractère distinctif de l'action magnétique, c'est que le corps qui y est soumis est attiré par l'aimant, et se place de façon à ce que sa plus grande dimension soit dans la direction de la ligne des pôles, c'est-à-dire prend la position dite *axiale* ou *polaire*. Au contraire, la plupart des autres corps sont repoussés par l'action magnétique et prennent une position *équatoriale*, telle que leur longueur se met à angle droit avec la ligne de jonction des pôles. La découverte de cette nouvelle condition magnétique est due à Faraday, qui la nomma *diamagnétisme*.

Répulsion diamagnétique.

Un petit barreau de bismuth, d'antimoine, de phosphore, de verre pesant (boro-silicate de plomb), et d'un grand nombre d'autres substances, suspendu dans le champ magnétique d'un puissant électro-aimant, se place perpendiculairement à la ligne des pôles. D'abord, cette direction fut attribuée à une faible polarité magnétique transversale, qui se développe assez facilement dans le laiton, le bronze et un petit nombre de substances susceptibles de s'aimanter légèrement (voy. chapitre précédent); mais des recherches très-délicates ont montré qu'il s'agissait là d'une action différente. On expérimenta avec des balles de substances fortement actives, de bismuth, de verre pesant par exemple, attachées à de longs fils, ou fixées à l'extrémité de leviers horizontaux extrêmement mobiles; lorsqu'on les mettait en regard d'un pôle, quel qu'il fût du reste, on constatait une répulsion manifeste et tellement prononcée que les substances allaient se fixer loin du pôle magnétique; et, quand on les plaçait entre les deux pôles, elles se fixaient à égale distance de chacun d'eux, c'est-à-dire là où l'action magnétique était minimum. Par conséquent, la

position équatoriale que prennent certains barreaux est tout simplement un effet de répulsion exercée par les aimants ; cette direction étant celle le long de laquelle la force sollicitante est minimum.

Polarité diamagnétique incertaine.

Les recherches entreprises dans le but de savoir si les substances diamagnétiques présentent une polarité contraire à celle de l'aimant inducteur, n'ont pas réussi à trancher la question, et plusieurs physiciens distingués soutiennent encore la doctrine de la polarité renversée. M. Tyndall, à l'aide d'un ingénieux appareil, est parvenu à obtenir la déviation d'un système d'aiguilles aimantées très-sensible, au moyen de barreaux diamagnétiques mis en mouvement dans des hélices traversées par un courant ; et il regarde les mouvements des aiguilles comme des effets de la polarité diamagnétique. Mais on peut interpréter autrement les résultats de cet habile observateur. Sans entrer dans une discussion contradictoire à ce propos, nous ferons remarquer qu'il n'y aurait aucune impossibilité d'avoir une polarité diamagnétique. En effet, sous l'influence du mouvement magnétique, il n'est pas impossible qu'il se développe à l'intérieur de certains corps une rotation contraire à celle du tourbillon inducteur. L'idée peut paraître étrange à première vue ; cependant, pour reconnaître qu'elle n'a rien d'absurde, il suffit de se rappeler ce que nous disions tout à l'heure des moulinets dont les ailes ou hélices seraient disposées en sens inverse ; car, au milieu d'un même courant, les uns tourneraient dans un sens, et les autres en sens contraire. Il est possible que, dans l'expérience de M. Tyndall, le courant du tourbillon magnétique renforce non-seulement les courants moléculaires dirigés dans son sens, mais aussi ceux de sens opposé.

Théorie du diamagnétisme.

Si les rotations sont opposées, cela tient très-probablement à la forme des molécules intégrantes, autour desquelles elles s'accomplissent. Ces molécules ont des moments d'inertie inégaux, toutes leurs dimensions ne sont pas les mêmes, l'inclinaison des lignes qui déterminent leur figure extérieure est très-variable, de là une facilité plus grande à entrer en mouvement dans telle direction que dans toute autre. C'est une observation déjà ancienne, que la substance la plus magnétique est précisément celle dont la structure fibreuse est la plus prononcée,

preuve certaine que la forme des molécules n'est pas indifférente. En outre, rappelons-nous que, dans les questions de mécanique, chaque action particulière ne doit être envisagée que comme partie de l'action générale qui s'exerce sur tout le système : ainsi nous voyons le moulinet de Woltman se maintenir toujours en avant dans le sens du courant par l'effet du courant lui-même agissant sur une plaque formant gouvernail et fixée à l'arrière de l'instrument ; de même, au sein des substances diamagnétiques, il peut naître une telle combinaison de mouvements que l'action exercée sur une partie oblige l'autre à marcher en sens contraire du courant, comme la réaction exercée par le gouvernail d'un navire, fait souvent avancer celui-ci contre le vent. Par conséquent, l'aimantation du fer dépendant non de la création de courants nouveaux, mais de la facilité avec laquelle s'orientent les courants préexistants dans les circuits moléculaires, il n'est pas impossible que, dans des circonstances particulières, les courants contraires soient les plus aisés à orienter. Rien ne s'oppose donc d'une façon absolue à la possibilité d'une polarité *diamagnétique*.

Magnétisme des gaz. Les aimants agissent non-seulement sur les solides, mais encore sur les liquides et les gaz; les flammes, surtout celles chargées de carbone, subissent une violente répulsion de la part des aimants; une bulle de savon gonflée avec l'hydrogène est violemment repoussée. L'oxygène au contraire est magnétique. Les comètes étant composées de carbone, comme le spectroscope l'a prouvé, leurs particules seraient-elles repoussées par le soleil magnétique?

De l'oxygène. L'intensité absolue de ces diverses actions, même des plus énergiques, est très-petite comparativement au pouvoir magnétique du fer; ainsi représentant par 1000 le pouvoir magnétique du fer, on trouve à poids égal + 337 pour l'oxygène et + 140 pour le perchlorure de fer en solution alcoolique; — 3 pour l'eau et — 65 pour le bismuth[1]. Ces valeurs sont en général assez faibles, à l'exception de celle appartenant à l'oxygène, qui est la plus grande : circonstance qui doit exercer une certaine influence sur la variation du magnétisme terrestre. L'atmosphère entière équivaut, sous le rapport magnétique, à une enveloppe de fer dont la terre serait

[1] Voyez pour d'autres nombres Daguin. 2e édition, t. II, p. 381-784.

recouverte sur une épaisseur de presque un millimètre. On conçoit qu'une pareille couche continuellement agitée puisse troubler l'aiguille aimantée, et que son pouvoir magnétique dépendant de la température, son échauffement aux différentes heures du jour puisse concourir à la production des variations diurnes de la boussole, en plus de l'action bien connue de l'électricité atmosphérique.

Intensité absolue de ces forces.

Quoique ces influences paraissent extrêmement peu énergiques, il ne faut pas croire qu'on puisse les négliger dans l'économie des forces naturelles. Au contraire, sous le rapport de l'intensité, elles se placent bien avant la gravitation universelle, alors même que leur action s'exerce sur des masses égales. Les expériences comparatives de Reich, Baily et Cavendish ne laissent aucun doute à cet égard. On sait qu'il a fallu des masses d'un poids de plusieurs milliers de livres pour imprimer à l'aiguille d'une balance de torsion une déviation moindre que celle obtenue en faisant agir sur une balle de bismuth un électro-aimant d'une puissance ordinaire.

Relations avec les autres forces.

Jusqu'ici aucune relation n'a été trouvée entre le pouvoir diamagnétique d'une substance et ses autres propriétés physiques et chimiques; seulement tout indique qu'il dépend de la structure moléculaire et que les phénomènes de cet ordre sont intimement liés au mouvement électrique intérieur, qui se traduit à nous par les courants thermo-électriques. Dans une question aussi obscure, nous devons savoir profiter des moindres analogies ; il est donc utile de remarquer que les corps les plus diamagnétiques, le bismuth et l'antimoine, sont précisément parmi les substances conductrices celles qui, accouplées, donnent naissance à des courants thermo-électriques très-énergiques. Toutefois disons que tandis qu'ils donnent des courants de sens contraire, tous deux sont diamagnétiques ; les deux propriétés ne sont donc comparables qu'à certains égards.

Influence de la structure moléculaire.

La structure moléculaire, soit naturelle, soit artificielle, c'est-à-dire communiquée aux substances par la compression ou tout autre procédé mécanique, influe d'une manière très-prononcée sur la direction que prennent ces corps déplacés dans le champ magnétique. Les métaux cessent d'être diamagnétiques lorsque par la fusion ils abandonnent l'état solide : nous savons que dans

les mêmes conditions, ils ne donnent plus naissance à des courants thermo-électriques. Quant aux corps non métalliques, dans le phosphore, l'eau, les gaz, la chaleur ne détruit pas les propriétés diamagnétiques. De là nous pouvons déduire que dans ces derniers la qualité diamagnétique dérive de courants rigoureusement moléculaires, tandis que dans les métaux la circulation des courants s'effectue autour de la masse finie des molécules intégrantes. Ce fait nous ramène aux idées exposées plus haut relativement à la différence du mouvement circulatoire électrique dans les métaux et dans les isolants, et confirme ce que nous disions alors, à savoir que dans les métaux la circulation s'effectue dans des masses sensibles, tandis que dans les isolants elle est moléculaire. Nous avons remarqué à ce propos que le fer, amené à l'état de fusion, perd pour ainsi dire complétement sa vertu magnétique, car pour la rendre sensible il faut user des moyens les plus puissants.

De la pression artificielle.

Les substances faiblement magnétiques agissent comme si elles étaient diamagnétiques lorsqu'elles sont réduites en plaques minces dans certaines conditions. Matteucci, examinant les corps dont la densité par des procédés convenables est rendue inégale dans les divers sens, est arrivé à la règle suivante : *Le corps se dirige de telle sorte que la ligne de compression maximum soit disposée axialement quand la substance est magnétique et équatorialement lorsqu'elle est diamagnétique*[1]. Exemple : un cube de bismuth comprimé se fixe avec la ligne de compression équatorialement et un cube fait de lames minces artificielles s'oriente de façon à ce que les lames soient en position équatoriale, chacune d'elles agissant comme un petit barreau : au contraire des cubes taillés dans du bismuth cristallisé suivant différents plans de clivage, sont neutres pour certaines directions de clivage par rapport aux faces artificielles; mais en général le plan du clivage le plus facile se dirige axialement dans les substances magnétiques et équatorialement dans les diamagnétiques. Ainsi dans ces cas chacune des petites lames se comporte comme un barreau isolé. Dans le cas où ces trois clivages sont égaux, comme dans le sel gemme, ou nuls, comme dans le quartz, les corps ne s'orientent pas. Les substances fibreuses, l'ivoire par exemple, se placent équatorialement.

[1] *Traité d'induction*, p 254.

La position définitive d'une substance dans le champ magnétique dépendant, comme on le voit, de la forme extérieure et de l'agrégation moléculaire, il était naturel d'examiner sous ce rapport les cristaux dont la structure n'est pas la même dans les divers sens. Des recherches ont été entreprises par Pluker puis par d'autres, et on pensa d'abord que les résultats obtenus, relativement à la distribution intérieure de l'éther revenaient à ceux déjà fournis par l'étude des propriétés optiques. En effet dans un grand nombre de cristaux à un seul axe, celui-ci se dispose axialement pour les substances dites attractives par les opticiens, dont l'axe de densité maximum coïncide avec l'axe optique ; pour les autres dites négatives, il se place équatorialement. Enfin, dans les cristaux à deux axes, c'est une ligne équidistante de chacun d'eux qui prend la position axiale. C'était là une conclusion précipitée : des expériences ultérieures ont établi que la direction des cristaux dans le champ magnétique dépend plus de la direction du clivage que de celle des deux axes optiques, et que la ligne de densité maximum est celle le long de laquelle les forces magnétiques s'exercent avec la plus grande intensité ; en sorte que si une substance est magnétique cette ligne s'oriente axialement, et équatorialement quand la substance est diamagnétique. Ce résultat est parfaitement d'accord avec celui obtenu en opérant sur des corps comprimés. Corps cristallisés

Ainsi dans les diamagnétiques c'est la ligne de densité maximum qui se dispose équatorialement, et cette ligne renferme dans l'unité de longueur le plus grand nombre de molécules, par conséquent les cristaux diamagnétiques ne se comportent pas autrement que des corps homogènes ayant une forme allongée : dans ceux-ci, en effet, l'orientation équatoriale appartient à la ligne, rencontrant à l'intérieur du solide le plus grand nombre de molécules.

Concluons donc que la direction d'un corps dans le champ magnétique, varie : 1° selon que la substance est magnétique ou non, et que par suite elle est attirée ou repoussée par l'aimant ; 2° elle dépend de la direction de la compression intérieure. Conclusions.

La meilleure façon d'expliquer ces phénomènes nous paraît être celle que déjà nous avons signalée dans le chapitre précédent. On peut diviser les corps en deux classes, dans les uns les mou- Théorie du diamagnétisme.

vements rotatoires moléculaires peuvent céder à l'action du tourbillon magnétique, dans les autres il n'en est pas ainsi. Les premiers sont nommés magnétiques, et les autres diamagnétiques. Dans ce dernier cas, évidemment, les rotations intérieures éprouveront une grande difficulté à continuer leur mouvement dans le tourbillon magnétique, et naturellement la ligne le long de laquelle ces rotations sont les plus nombreuses se porte là où le mouvement antagoniste est moindre. Aussi, quand les corps sont entièrement libres ils s'éloignent des pôles de l'aimant, et quand ils sont maintenus dans l'espace interpolaire, ils se placent de façon à occuper la partie du champ magnétique où l'énergie polaire est minimum, c'est-à-dire équatorialement, d'où la répulsion apparente. De même un corps flottant librement au milieu d'un cours d'eau, se place de façon à offrir la moindre résistance au fluide. Ainsi la ligne suivant laquelle le tourbillon rencontre la plus grande somme de résistance, se dirige équatorialement : laquelle ligne dans une masse figurée homogène est la dimension dominante, et dans une masse comprimée la ligne de plus grande densité.

Considérons le cas d'un corps magnétique ; ici la somme des rotations mobiles et qui toutes deviennent parallèles les unes aux autres, comme nous l'avons dit à propos des aimants, forcera le solide à se diriger axialement. Les piles de lamelles prendront l'une ou l'autre position suivant que prévaudra l'influence de la densité ou celle de la forme extérieure, mais la première influence en général l'emportera de beaucoup sur la seconde, car elle agira directement sur les rotations moléculaires et modifiera la mobilité du milieu.

Conclusion.

De ces indications théoriques il ressort que le tourbillon circumpolaire d'un aimant est un milieu résistant au sein duquel les mouvements des corps diamagnétiques sont gênés, fait qui du reste est mis en pleine lumière par les expériences citées à la fin du chapitre précédent.

Action différentielle sur les liquides et les gaz.

La position que prend un solide entre les pôles d'un aimant, est déterminée par la résultante totale des actions magnétiques sur les diverses molécules, mais dans les liquides et dans les gaz, chacune des molécules peut s'orienter librement, et alors on observe

une circonstance qui montre que le diamagnétisme est une pure action différentielle, c'est-à-dire qu'une substance magnétique peut sembler diamagnétique si elle est moins magnétique que le milieu dans lequel elle est plongée, de même que les corps pesants s'éloignent de la surface de la terre, quand ils pèsent moins, à égal volume, que le milieu environnant : ainsi le principe des pressions différentielles, ou principe d'Archimède, trouve encore son application dans les phénomènes magnétiques. Cette remarque est d'une grande importance, car elle indique l'existence autour des aimants d'une pression continue engendrée par le mouvement magnétique et confirme ce que nous avons dit de l'action des aimants, lorsque nous l'avons expliquée par le mouvement d'un fluide qui entraîne le corps dans le sens où le tourbillon a la moindre activité.

Mais ces rotations moléculaires auxquelles nous attribuons une importance si considérable, ont-elles lieu réellement? avons-nous quelque preuve de leur existence à l'intérieur des corps? La réponse est très-simple : de preuves directes nous n'en avons aucune, car ces rotations ne peuvent ni se voir ni se toucher, mais les preuves indirectes abondent, et cela suffit, car qui ne veut accepter que des démonstrations directes et palpables, doit renoncer à l'étude de la philosophie naturelle. Ampère accueillit avec grande joie la découverte de Seebeck, car le nouveau moyen de développer l'électricité par la chaleur montrait la possibilité, dans des circuits entièrement métalliques, de courants semblables à ceux qu'il admettait autour des particules des aimants[1]. Aujourd'hui les expériences de Faraday, cet habile et infatigable observateur, nous ont fourni des preuves bien autrement concluantes. Preuve des rotations moléculaires.

Disposant (fig. 61) un parallélipipède *c* de verre pesant ou de verre ordinaire entre les pôles d'un très-fort électro-aimant MN de façon à le faire traverser suivant la ligne des pôles *ab* par un rayon de lumière polarisé[2], il observa une déviation du plan de polari-

[1] *Recueil*, etc., p. 378.

[2] Les électro-aimants MN sont fixés à deux chariots *o* et *o'* mobiles sur un support *k*. — Le courant est introduit dans les bobines par les fils A*eg*B, à l'aide du commutateur H. En *b* et en *a* sont deux prismes de Nicol : le premier servant de polariseur, le second d'analyseur. A l'aide d'une alidade, ce dernier tourne au centre d'un cercle gradué de façon à permettre d'apprécier la déviation du plan de polarisation.

Rotation des rayons lumineux par le magnétisme.

sation dans le sens que présenteraient les courants d'Ampère que l'on peut imaginer dans un fer doux placé entre les pôles de l'électro-aimant. L'expérience réussit plus difficilement avec les corps cristallisés : cependant elle donne des résultat positifs, et il en est de même avec tous les autres corps transparents solides ou liquides, seulement la déviation est plus ou moins prononcée.

Une telle propriété est analogue à celle que présente le quartz mais il y a des différences capitales à relever. Nous avons déjà fait

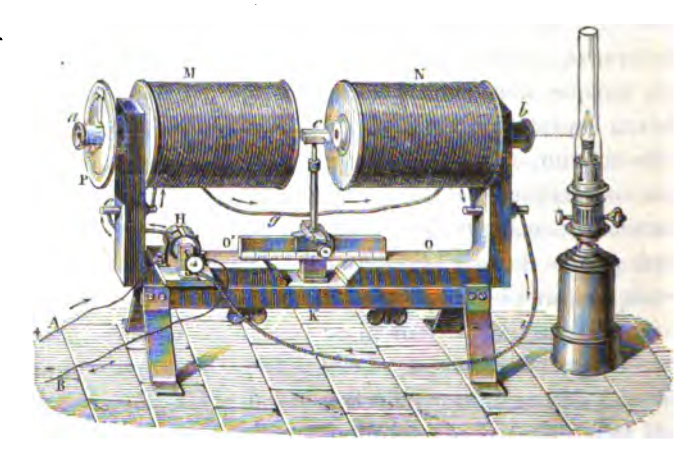


Fig. 61.

connaître l'explication ingénieuse qu'en avait donnée Fresnel en montrant que cela était dû à un dédoublement du rayon lumineux. Le rayon simple à l'entrée se dédouble à l'intérieur du cristal, et les vibrations qui constituent les nouveaux rayons ne sont pas rectilignes mais circulaires et de sens opposé dans chacun d'eux. Fresnel parvint à isoler les deux rayons au moyen d'un ingénieux système de prismes et à démontrer que l'un et l'autre étaient polarisés circulairement comme cela arrive dans la réflexion totale à l'intérieur de certains prismes de verre. Enfin il prouva que la déviation du plan de polarisation dans les lames de faible épaisseur résultait de la recomposition de deux vibrations circulaires l'une dextrorsum et l'autre sinistrorsum en une vibration unique rectiligne et que l'angle de déviation dépendait du

retard relatif de l'un des deux rayons qui ne traverse pas le cristal avec la même vitesse.

On a constaté que le pouvoir de faire tourner le plan de polarisation n'appartenait pas exclusivement au quartz, et que diverses substances le possédaient également : tels sont certains liquides, comme le sirop de sucre, la dextrine, l'essence de térébenthine, qui dévie encore le plan de polarisation alors qu'elle est à l'état de vapeur. Il résulte de là que l'effet produit par les corps sur le plan de polarisation est dû à l'une des deux influences suivantes : l'action individuelle des molécules ou l'arrangement des molécules dans la structure du solide. Le premier cas se présente dans les liquides et la vapeur d'essence de térébenthine ; le second est celui du quartz qui est dextrogyre ou lævogyre, suivant les faces de la figure plagiédrique, et qui perd toute action en perdant sa structure cristalline, si bien que la silice fondue est inerte. Dans les liquides, on n'a pas encore réussi à séparer les rayons comme dans le quartz. Rotation ordinaire.

Enfin il est une troisième condition qui peut donner aux substances le pouvoir rotatoire ; c'est le magnétisme. Mais ce genre d'action est caractérisé par une circonstance essentiellement différente. Avec les substances nommées ci-dessus, la rotation se fait dans une direction toujours la même par rapport à la direction du rayon transmis, de telle façon qu'elle reste la même quand on retourne la lame active face pour face. Il arrive ici ce qui se passe lorsque, tenant une vis à la main, on en regarde soit une extrémité, soit l'autre, on voit le filet s'enrouler toujours dans le même sens autour de l'axe. Par conséquent, si un rayon traverse une lame de substance à polarisation rotatoire deux fois en sens contraire, par exemple une première fois de *a* en *b*, puis une seconde fois après avoir éprouvé une réflexion de *b* en *a*, la rotation est nulle, ce qui est facile à vérifier dans le quartz. Différence de ces deux rotations.

Au contraire, dans le cas du pouvoir rotatoire causé par le magnétisme, la déviation ne dépend pas de la position de la plaque, mais de celle de l'aimant. La rotation se fait à gauche quand le pôle sud est tourné vers l'observateur, et se fait vers la droite de l'observateur, alors que le pôle nord est le plus voisin de lui. Ce renversement de la rotation du plan de polarisation est facile à

obtenir à l'aide d'un électro-aimant, car il suffit de changer le sens du courant. Lorsque, soumettant une substance transparente à l'action d'un aimant, on fait passer un rayon plusieurs fois à travers la plaque, la déviation du plan de polarisation augmente de plus en plus.

Analyse théorique de cette différence.

Cette différence montre que les phénomènes n'ont pas exactement la même origine. En effet, il est deux manières de concevoir comment les deux spirales, l'une dextrorsum et l'autre sinistrorsum, en lesquelles se divise le rayon lumineux à l'entrée, arrivent à se superposer à la sortie avec une différence de phase et d'angle de rotation.

La première consiste à faire marcher moins vite, comme l'on dit, un des deux rayons; alors, au moment de la sortie, tandis que l'un des rayons effectue n tours durant son trajet au travers de la substance, l'autre est resté dans le corps transparent, pendant n tours, plus ou moins un arc d'un certain nombre de degrés; à ce mouvement a participé solidairement toute la spirale qui marche plus ou moins vite pendant que chaque molécule fait son tour dans un temps toujours le même.

La seconde manière d'envisager les choses est de supposer les molécules dans leurs orbites avec des vitesses gyratoires différentes sur les deux rayons, et ainsi l'un des rayons fait une circonférence pendant que l'autre en fait une, plus une fraction de degré, de telle sorte qu'après n tours il y aura une différence de phase, comme dans le premier cas, mais alors sans séparation des rayons.

Le quartz étant biréfringent, à l'intérieur de ce cristal nécessairement les deux rayons marchent avec une vitesse de propagation différente; par suite la première hypothèse lui convient exactement, car de là résulte que, si la marche d'un rayon s'accélère, quand il va de droite à gauche, elle se ralentira d'autant, lorsqu'il ira de gauche à droite.

Particularité de la rotation magnétique.

Mais dans la déviation du plan de polarisation par le magnétisme, on n'est pas encore parvenu à mettre en évidence la double réfraction du rayon, par conséquent l'accélération ou le retard du rayon doit être expliqué d'après la seconde hypothèse citée tout à l'heure. Et même il n'y a que ce moyen d'expliquer comment la

marche du rayon est accélérée aussi bien pendant l'aller que pendant le retour; car, seulement dans le second des deux cas admis comme possibles, les rotations sont indépendantes du sens de la translation de l'onde, et ne changent pas, le sens de la gyration restant le même, que l'onde aille de *a* vers *b* ou de *b* vers *a*. Cela posé, la déviation du plan d'un rayon polarisé s'explique parce que, à l'intérieur des corps soumis au magnétisme, le rayon lumineux ne reste pas linéaire dans le premier plan de polarisation; mais, rencontrant un milieu où l'influence de l'aimant développe des rotations en deux sens opposés, il se propage par vibrations circulaires, et celles qui marchent *suivant* le tourbillon magnétique sont *accélérées*, et celles qui le contrarient sont *retardées*.

A toute la rigueur, comme le dédoublement du rayon n'est pas constaté par l'observation, on pourrait croire qu'ici le phénomène est plus simple que dans les cristaux, et que les oscillations éthérées devant se propager dans un milieu qui est en mouvement de rotation, les atomes participent à ce même mouvement. En tout cas les vitesses de rotation sont bien faibles en proportion de la vitesse de propagation. Autre explication.

La rotation du plan de polarisation est toujours assez faible; elle atteint 12° à 13° pour un trajet d'environ un pouce lorsqu'on emploie des aimants fort puissants. Cela prouve que l'accélération du mouvement hélicoïdal de l'atome lumineux produite par l'action magnétique est une fraction extrêmement petite de la vitesse qui anime l'atome lui-même[1]. On a ainsi une idée de la vitesse du tourbillon par rapport à celle des vibrations lumineuses circulaires, et on voit combien le mouvement éthéré magnétique est plus lent que celui qui constitue la lumière.

Par conséquent, à l'intérieur des aimants, les mouvements éthérés venus du dehors se transforment en mouvements circulaires. En confirmation de ceci il faut rappeler l'explication que donna Ampère de la rotation des aimants par les courants. Il démontra que lorsqu'on fait passer un courant à travers le corps d'un

[1] Supposant une déviation de 20° pour 25 millimètres, l'avance d'un des rayons sera 10° et le retard de l'autre 10°, et comme sur cette longueur il se fait environ 4 millions d'ondes lumineuses jaunes, l'avance se réduit, tout calcul fait, à être un peu moins de 1/100 de seconde par tour de spire et de l'orbite hélicoïdale du rayon.

aimant en équilibre au milieu d'un bain mercuriel, la portion rectiligne du courant qui parcourt le barreau se comporte comme si elle n'existait pas, c'est-à-dire *comme si l'on avait supprimé cette portion du circuit total*[1]. Il faut donc dire que le mouvement rectiligne du courant, se résolvant en une accélération des rotations moléculaires, devient circulaire à l'intérieur de l'aimant, de même que quelquefois l'oscillation rectiligne de la lumière se change en vibration circulaire.

Exception à la règle des rotations.

Toutes les substances diamagnétiques font tourner le plan de polarisation dans le sens du courant ; mais il y a quelques corps magnétiques, comme le chlorure de titane et certaines dissolutions salines, qui impriment à ce plan une rotation contraire. Par exemple, le chlorure de fer a une force rotatoire 6 à 7 fois plus grande que l'action diamagnétique de l'eau. Ce fait vient appuyer l'opinion la plus accréditée parmi les physiciens, que le tourbillon n'agit pas sur les molécules lumineuses d'une façon directe, mais seulement médiatement, parce qu'il modifie la matière pesante. Il en est de même des recherches de De la Rive et Verdet, qui ont prouvé que la rotation n'est pas proportionnelle au pouvoir réfringent de la substance; mais à son poids spécifique. La rotation négative exercée par les corps magnétiques est une exception curieuse; cependant elle peut s'expliquer en disant que, dans ces substances, une notable partie des rotations intérieures étant magnétiques, ces mouvements sont moins fortement accélérés par le tourbillon magnétique que ceux de sens contraire, parce que, possédant déjà en partie la vitesse du tourbillon, ce dernier ne peut leur communiquer le même accroissement qu'aux autres; par suite, l'influence dominante s'exerce sur les rotations contraires qui, par la résistance plus grande qu'elles opposent, reçoivent une accélération relativement plus marquée, et ainsi l'effet final sera celui qui convient à celles-ci.

Loi de la déviation.

Avec les substances diamagnétiques, la déviation du rayon a été trouvée proportionnelle à l'intensité de la force magnétique employée; et pour les directions obliques, on a reconnu qu'elle variait en raison directe de la composante magnétique et en raison inverse

[1] Ampère, *Recueil*, p. 369.

du carré des distances comme toutes les autres actions. Le pouvoir rotatoire d'une substance dépend de la compression (Matteucci), et de tout ce qui peut altérer la liberté des molécules. Ainsi, il augmente quand on rend les mouvements moléculaires plus faciles; par exemple, la rotation des différentes espèces de verres croît lorsqu'on les chauffe et s'affaiblit quand on les comprime. Telle est encore la raison de la très-faible intensité de la puissance rotatoire que présentent les corps cristallins, spécialement ceux de formes très-compliquées. Les récents travaux de Verdet ont démontré qu'à ces rotations ne s'applique pas la loi trouvée pour les autres, d'être en rapport inverse du carré de la longueur d'onde. De là une nouvelle raison d'admettre que les deux genres de mouvements rotatoires n'ont pas la même origine et ne s'accomplissent pas suivant le même mécanisme.

Malgré les nombreuses recherches entreprises sur cette question intéressante, il reste encore beaucoup à faire. Le diamagnétisme est d'une observation délicate; en outre, la difficulté que l'on éprouve à se procurer des substances pures, de structure homogène et de forme régulière, est un obstacle sérieux à l'établissement d'une théorie générale. Toutefois il résulte clairement des faits exposés ci-dessus que :

1° Le magnétisme est réellement un agent dont l'action s'exerce sur tous les corps. Conclusions générales.

2° Les rotations intérieures admises dans les aimants existent aussi dans les autres corps, avec cette différence que, dans un très-grand nombre, elles n'ont pas une mobilité suffisante pour s'orienter dans le sens du tourbillon magnétique du fer, quoique cependant elles n'échappent pas à son influence.

3° Le diamagnétisme n'est pas une force spéciale, mais un simple effet de la résistance qu'éprouvent les mouvements gyratoires des molécules au milieu du tourbillon magnétique. C'est le nombre et la distance relative des molécules qui déterminent la position d'un corps dans le champ magnétique : autrement dit, cette direction se règle sur celle de la ligne de plus grande densité, et celle-ci se place axialement lorsque les courants des molécules présentent une grande mobilité et une orientation facile, tandis qu'elle est repoussée là où la résistance est minimum,

quand les rotations intérieures ne sont pas susceptibles de s'orienter.

4° En général, les rotations magnétiques sont plus lentes que les mouvements circulaires auxquels en optique on attribue la déviation du plan de polarisation. Elles consistent sans doute en tourbillons comprenant un grand nombre de molécules, de telle sorte que ces mouvements circulatoires sont assez étendus relativement aux petits tourbillons des molécules. Ceux-ci dès lors se comportent comme s'ils étaient immergés dans des courants rectilignes, et par suite, suivant leur forme, les molécules tournant en sens contraire du tourbillon magnétique, peuvent avoir leur mouvement retardé ou accéléré. Telle est la conception qui permet d'embrasser dans un même ensemble le nombre considérable des faits connus jusqu'à présent. Il se trouve, à la vérité, quelques observations peu concordantes avec les autres, mais aucune d'elles ne paraît contredire le principe fondamental.

5° C'est par ces mouvements circulatoires que se propage le courant dans les corps magnétiques : cela du moins semble clairement indiqué par les phénomènes optiques et par les observations d'Ampère relatives à la rotation continue d'un aimant sous l'influence d'un courant. Ce grand physicien a démontré que, dans ces circonstances, la portion rectiligne de courant qui fait corps avec le cylindre aimanté est comme si elle était supprimée du circuit total ; il faut donc que le mouvement de l'éther devienne circulaire à l'intérieur du barreau, car le calcul permet d'établir que sans ce mouvement circulaire la rotation du barreau ne saurait avoir lieu.

Insuffisance des actions à distance.

Des faits exposés dans ce chapitre il ressort une autre conséquence : c'est que les prétendues actions à distance se réduisent à des actions qui s'exercent par l'intermédiaire d'un milieu environnant. En effet, combien d'actions diverses, toutes extraordinaires dans leur manière d'agir, ne devrait on pas imaginer pour expliquer les phénomènes si variés du diamagnétisme? Le cas d'un corps magnétique plongé dans un milieu plus magnétique correspondrait au cas d'une force qui, attractive jusqu'à une certaine distance, deviendrait ensuite répulsive. L'action sur le cube de cuivre tournant ne saurait être seulement attractive, il faudrait de

plus la supposer révolutive, car la neutralisation de l'effet de torsion du fil suppose un couple opposé au couple de torsion, ce que ne sauraient produire des forces simplement attractives résultant de la forme des masses influencées, le cube étant parfaitement symétrique. La rotation du plan de la lumière polarisée serait attribuée à une force révolutive spéciale, mais alors on serait forcé de la considérer comme variant avec la nature des substances, puisque celles-ci tournent à droite, celles-là à gauche, et ainsi de suite.

Si l'on éprouve quelque peine à expliquer les phénomènes de diamagnétisme par des mouvements spéciaux de l'éther, les mêmes difficultés se présentent quand on leur donne pour cause des forces abstraites; et comme dans ce cas il faut imaginer des forces ayant des propriétés exceptionnelles et même contradictoires, cette seule considération suffirait pour nous faire repousser toute théorie de ce genre.

Généralité de la force magnétique.

La masse imposante de ces faits prouve encore que nous avions raison en affirmant dès les premières lignes de ce chapitre que le magnétisme est rangé aujourd'hui parmi les forces cosmiques, puisqu'il n'est aucun corps qui échappe à son action. Si, en outre, on se rappelle ce que nous avons dit de la grande quantité d'électricité mise en mouvement par le déplacement des métaux en présence de l'aimant terrestre, on comprendra qu'une telle action ne doit pas être négligée lorsqu'on parle des phénomènes moléculaires et surtout de la gravitation. Peut-être les particularités présentées par les comètes, les répulsions que l'on observe entre les éléments de leurs queues et de leurs chevelures ont une origine diamagnétique. Qui sait encore si les différences constatées par Baily, lorsque, répétant l'expérience de Cavendish, il introduit dans la balance de torsion des balles de substances diverses[1], ne sont pas dues au magnétisme?

Magnétisme planétaire.

Et à cela rien d'étonnant, puisque aujourd'hui le magnétisme occupe une place incontestable parmi les forces planétaires. Des observations nombreuses prouvent que le magnétisme n'est pas une propriété spéciale à la Terre; ainsi, certains aérolithes sont

[1] Voy. *Mémoires de la Soc. astr. de Londres*, vol. XIV, p. 78.

magnétiques. D'après les travaux de Kreil, Sabine, Bache et autres, la Lune influencerait les magnétomètres et son action varierait avec l'angle horaire de notre satellite. Le magnétisme solaire n'est pas encore un fait démontré; mais il est certain que cet astre agit sur la Terre comme un aimant, soit directement, soit indirectement. Le synchronisme de la période décennale des taches solaires et de la période des fluctuations magnétiques met hors de doute l'influence que les variations de l'astre central exercent sur les planètes par l'intermédiaire de l'agent magnétique. Voilà donc une force cosmique nouvelle, tandis que jusqu'ici on avait pensé que la gravitation était la seule force émanée du centre de notre système et exerçant son action à travers l'espace.

Il n'est donc point absurde d'admettre dans l'espace céleste un milieu en mouvement capable de transmettre l'action des astres; ce mouvement diffère de la vibration qui constitue lumière et chaleur, et nous n'hésitons pas à le nommer tourbillon, malgré le ridicule attaché à ce mot. Les astres, comme les aimants, sont enveloppés chacun d'un tourbillon; seulement, dans ceux-ci, vu leurs faibles dimensions, l'influence magnétique devient insensible à une distance très-faible. Ces tourbillons sont formés soit par des rotations d'une étendue très-restreinte, soit par une translation circulaire de l'éther. Les premiers pourraient bien être le résultat des mouvements vibratoires, comme Ampère l'a supposé pour les aimants. Quant aux seconds, rien ne s'oppose à ce qu'une partie du tourbillon soit animée de translation, et Fresnel lui-même admettait que la terre emporte avec elle une partie de l'éther environnant, idée qui a été confirmée par de récentes expériences d'optique.

CHAPITRE XVII

RÉCAPITULATION ET CONCLUSION.

Nécessité de ce résumé. La longueur et la difficulté du sujet traité dans ce livre nous oblige à grouper devant les yeux du lecteur les idées exposées dans les chapitres précédents et à lui faire bien saisir la filiation des raisonnements qui ont motivé nos conclusions; car, à diverses re-

prises, il nous a fallu interrompre le cours réguliers de la démonstration générale pour traiter divers cas particuliers.

En électricité, plus que dans les autres branches de la physique, les lacunes sont nombreuses, et malgré notre préoccupation constante de ne point perdre de vue les faits, en leur absence force a été d'invoquer les analogies et de chercher les hypothèses les plus probables. Aussi, de nos conclusions, les unes seront acceptées sans conteste, car elles ne s'écartent pas des idées reçues; mais nous ne nous faisons pas illusion jusqu'à croire qu'il en sera de même pour toutes les autres; cependant nous espérons que même celles-là ne seront pas rejetées sans examen, et peut-être leur discussion mettra-t-elle sur la voie de la vérité. Cela dit, résumons notre thèse.

L'ensemble des phénomènes appelés habituellement électriques nous révèle l'existence dans la nature d'une force expansive que développent toutes les actions capables de troubler le régime moléculaire des corps, qu'elles soient mécaniques, chimiques, calorifiques ou magnétiques. Cette force revêt deux modalités bien distinctes : à l'état de *tension*, elle se manifeste par l'attraction et la répulsion des corps; sa présence à l'état de *courant* est décelée par la décomposition chimique, les mouvements des aiguilles aimantées, les secousses physiologiques, l'échauffement des conducteurs, etc., etc.

Force révélée par l'électricité.

Ses modalités : Tension. Courant.

Dans ce troisième livre, notre but a été de trouver quelle pouvait être la nature des phénomènes électriques, et à telle fin nous nous sommes adressés à la pile de Volta, comme étant l'appareil qui permet d'étudier avec la plus grande facilité l'agent électrique dans ses deux conditions. La comparaison des relations observées dans ces deux états nous a appris qu'ils sont toujours *corrélatifs*, et que l'un cesse quand l'autre commence. D'où il suit que l'*agent mis en mouvement est unique*, *mais qu'il se traduit au dehors par deux séries d'effets différents*. Les propriétés des conducteurs qui, réunissant les pôles d'une pile, sont évaluées par la force électrique, nous prouvent qu'elle ne siége pas seulement à la surface, mais qu'elle pénètre à l'intérieur des corps, et que souvent elle les désagrége mécaniquement ou les décompose chimiquement. Dans tous ces effets apparaît une *direction déterminée de l'action*, qui se

Direction du ourant.

distingue ainsi des simples influences exercées sur les corps légers et des simples mouvements oscillatoires. En outre, quand les conducteurs sont envahis par l'électricité et placés dans des conditions convenables de mobilité, ils ont la propriété de surmonter une résistance incessamment renouvelée, de vaincre des frottements; par conséquent, ils sont animés d'une force vive qui restitue au système la quantité de mouvement détruite par la résistance; en un mot, il *se produit un véritable travail*. On ne peut donc faire de l'électricité dite de *courant* une force statique dépendant soit d'un simple équilibre de fluide, soit de forces tendant vers des centres fixes, comme le sont les orientations dues à la polarité; mais on doit l'envisager comme une *condition dynamique* capable de fournir la force vive nécessaire à l'accomplissement d'un travail continu mécanique, thermique ou chimique.

Travail accompli.

Ainsi caractérisée, la cause des phénomènes électriques se trouve être un agent parfaitement distinct de ceux étudiés dans les deux premiers livres. La pile devient une machine en activité qui accomplit un véritable travail.

Or, dans tout système mécanique de ce genre, deux *éléments* sont à considérer : 1° la source de l'action, c'est-à-dire le principe générateur de la force vive; 2° la manière dont se transmet cette force d'un point à l'autre.

Source d'action.

La première est facile à trouver, c'est l'altération chimique des matériaux qui constituent l'électro-moteur : dans celui-ci les métaux s'oxydent, de sorte qu'une pile produit le travail en *brûlant* du zinc, comme une machine à feu ordinaire le produit en brûlant du charbon. Ainsi il est facile de comparer cette force à une autre force plus connue, reste à expliquer les circonstances qui accompagnent cette combustion dans la pile, circonstances bien différentes de celles de la combustion ordinaire.

Il est moins aisé d'avoir une notion claire du deuxième élément, le mode de transmission.

Dès les premières découvertes sur la pile, les physiciens admirent une matière en mouvement. C'est en effet l'idée qui se présente spontanément à l'esprit; mais cette première conception était vague, mal définie, et il était nécessaire que les faits vinssent en donner une assurance précise. Ce mouvement est-il de vibra-

tion ou de translation : est-il analogue à celui qui constitue la chaleur, ou bien est-il un transport de fluide? Et, dans ce cas, le fluide est-il la matière pesante très-atténuée, mais conservant toutes les propriétés de la matière ordinaire? ou bien est-ce quelque autre matière subtile qui entre comme élément dans la constitution de tous les corps ; par exemple, celle dont les phénomènes lumineux nous ont révélé l'existence?

Le courant véritable flux

Lorsqu'on étudie d'une façon comparative les propriétés des vibrations et celles du courant, on reconnaît bien vite que le mouvement qui anime les conducteurs interpolaires d'une pile n'est pas une simple vibration thermique; s'il en était ainsi, les relations entre l'effet thermométrique d'un courant et son intensité seraient fort différentes de celles fournies par l'observation, et en particulier la température ne varierait pas en raison du carré de la section. Bien au contraire, l'expérience directe a prouvé que le courant obéit aux lois de tous les fluides en mouvement et satisfait à l'équation de continuité, c'est-à-dire que sa vitesse est inversement proportionnelle à la section. Par conséquent, ce que l'on appelle *courant consiste en un véritable flux de matière dans l'intérieur des conducteurs*, et le mot courant est une expression heureuse, car elle représente exactement le phénomène.

de matière impondérable.

Reste à savoir si le flux est constitué par la matière pesante ou par une autre plus subtile. Un examen superficiel des phénomènes qui accompagnent les décharges de fortes tensions éclatant au milieu de l'air, ou dans les milieux raréfiés, ou à travers un solide, ont porté quelques physiciens à tout attribuer à une affection spéciale de la matière pondérable, car, pendant ces décharges, il y a toujours transport de parcelles solides. Mais si l'on examine les choses de plus près, on voit que ces parcelles sont détachées de la surface seulement ; et, lorsque des conducteurs de nature différente sont réunis les uns à la suite des autres, on ne trouve jamais la matière de l'un entraînée dans l'intérieur de celui qui vient après. Il est naturel de conclure de là que le transport de particules pesantes et dû à l'action expansive du courant, que la matière pondérable est passive, qu'elle favorise la décharge, mais n'en est pas la cause efficiente.

Il est encore une autre observation à faire ici. Puisque le courant

ne consiste pas dans une vibration interne du conducteur, comme cela est prouvé pour le calorique, mais en un véritable transport, autrement dit en un flux, il serait nécessaire d'admettre que, malgré leur cohésion, les particules constitutives des conducteurs pussent, au moins en partie, changer de place et se transporter avec l'immense vitesse qui caractérise le mouvement électrique.

Impossibilité qu'il soit de matière pondérable.

On se demande alors comment la matière pesante acquiert une aussi prodigieuse mobilité et une grande activité; comment, sous l'action de forces très-faibles, elle peut s'élancer dans les conducteurs et les parcourir sur une longueur énorme, malgré la résistance qu'ils lui opposent. Cela n'est explicable que par l'une des deux hypothèse suivantes : ou la matière pesante en circulation dans les conducteurs est tellement atténuée que pour elle les obstacles n'existent pas, de sorte qu'ainsi elle ne présente plus les propriétés de la matière grossière, et qu'il est impossible de la reconnaître à ses caractères physiques et chimiques; ou bien la substance qui entre en mouvement est extrêmement mobile et fluide, comme celle qui constitue l'éther, et c'est elle qui ébranle la matière pondérable. La première partie de cette proposition ne sera certainement pas acceptée par les adversaires de la théorie éthérée, pour lesquels les phénomènes électriques sont de simples affections de la matière pesante dans son état ordinaire et conservant toujours et partout ses divers attributs. Du reste, si on admettait cette transformation, elle serait contredite par les faits, car les particules transportées conservent leur nature chimique, comme le prouvent les raies spectrales émises pour ces parcelles en ignition; et de plus, dès l'instant où l'on supposerait la matière se modifiant de façon à permettre de tout expliquer et à éviter toutes les difficultés, cette hypothèse ne différerait pas essentiellement de la seconde, parce que la matière subtile nommée éther n'est autre que la matière ordinaire à son état de simplicité atomique. On arrive donc par voie d'exclusion à attribuer les faits observés au mouvement d'une matière très-subtile que l'on nomme éther, pour simplifier le langage,

Flux simple.

Tous les phénomènes de transport opérés par l'électricité mettent en évidence deux grandes vérités : 1° le courant est un flux de sens défini, il circule du pôle positif au pôle négatif; 2° il n'est

point nécessaire d'admettre deux courants contraires, attendu que les faits cités comme établissant l'existence du courant négatif sont explicables par l'effort expansif de l'électricité, dont l'intensité subit un accroissement notable aux extrémités libres des deux corps qui se déchargent. Il faut excepter les cas dans lesquels, pendant les volatilisations, survient une décomposition chimique, parce qu'alors les transports peuvent se faire aux pôles opposés, comme dans la décomposition des liquides.

Les différences d'éclat et de température que présentent les pôles dans les décharges discontinues viennent à l'appui de nos conclusions. En effet, au pôle positif, d'où sort le courant, on a la plus grande intensité de vibrations et une lumière plus vive; mais en même temps, la force vive calorifique étant absorbée par la volatilisation, ce même pôle s'échauffe moins, tandis que, par contre, au pôle négatif, où s'accumule la matière transportée et où en quelque sorte elle se condense, la température s'élève beaucoup, mais la lumière est moindre, et les masses mises en mouvement sont en raison inverse des vitesses[1]. Différence des pôles.

La meilleure manière de nous éclairer sur la nature du courant, c'est d'en étudier l'origine; aussi avons-nous traité ce sujet d'une manière assez étendue. Si nous laissons de côté pour un moment les actions mécaniques et magnétiques, nous pouvons dire que l'action chimique et l'action thermique sont les deux sources principales du courant. Dans une pile voltaïque, le flux électrique dérive tout entier des réactions chimiques intérieures, et aussi variés que soient les travaux extérieurs, leur somme n'est jamais supérieure à celle des travaux qui ont lieu au dedans de l'électromoteur, et la somme des deux ne surpasse jamais celle que produirait directement l'altération chimique des éléments qui engendrent le courant. Origine du courant.

Lorsque, dans le circuit, aux effets chimiques s'en ajoutent d'autres d'espèce différente, mécaniques ou calorifiques, en les ramenant tous à un même genre, ce qui se fait par un calcul le plus souvent facile, connaissant les coefficients ou équivalents de transformation, on reconnaît qu'il y a constamment équivalence parfaite entre Équivalence des travaux dans la pile.

[1] Voy. Stokes, *Philos. trans.*, 1862, p. 619.

les forces vives extérieures et intérieures. La force ne se crée pas, et ne se tire jamais de rien; mais par l'intermédiaire de cet impondérable elle se métamorphose incessamment; tout se réduit à un mouvement qui se change en un autre, avec équivalence complète de force vive. En d'autres termes, le mouvement moléculaire chimique se change en mouvement thermique ou mécanique, de même qu'il en arrive à la chaleur du foyer d'un moteur à vapeur. De cette façon, la théorie de la pile se trouve ramenée à celle des machines à l'aide desquelles on transforme la force vive en travail.

Il n'est pas toujours facile d'évaluer les divers travaux que la pile accomplit, aussi trouve-t-on fréquemment qu'il y a disparition d'une certaine quantité de calorique employée on ne sait à quoi, tant on est loin de produire avec elle la force gratis. Parmi ces travaux qui passent inaperçus se trouve celui dont l'effet est de changer la direction des circuits moléculaires, leur arrangement et la cohésion des corps. Le refroidissement qui accompagne quelquefois le passage du courant, montre combien il faut ne pas se hâter de croire que l'on connaît tous les travaux accomplis par le mouvement électrique.

Tension polaire.

Dans toutes les dispositions voltaïques il se passe un fait d'une grande importance et très-propre à nous éclairer sur la nature du courant. L'action chimique déterminée par l'affinité des corps mis en présence se manifeste par la tension polaire des deux extrémités de la pile; mais cette action, dans certaines combinaisons, ne peut poursuivre son effet, si l'on ne met pas les deux métaux hétérogènes en contact à l'aide d'un arc conducteur. De plus, au moyen de ce circuit, on peut régler la quantité d'action et même l'enrayer complétement. D'où il résulte que : 1° les décompositions sont l'effet d'une tension statique se développant même dans les liquides qui de leur nature sont ou isolants ou mauvais conducteurs; et s'ils conduisent, ils le font précisément parce qu'ils se décomposent; 2° que dans ces circonstances l'action chimique se produit à la condition qu'il y ait transport de quelque chose à travers le fil. Lors donc que ce quelque chose manque, la décomposition des corps destinés à réagir les uns sur les autres ne peut avoir lieu, et pas davantage la formation d'un nouveau sys-

Nécessité de l'arc conducteur.

tème d'équilibre intérieur des molécules, soit pour faire une analyse, soit pour faire un autre composé. Mais puisque ce qui traverse le fil interpolaire n'est pas un simple mouvement oscillatoire, et présente au contraire tous les caractères d'un flux, il faut admettre qu'il y a là transport de quelque substance. Or ce n'est pas la matière pondérable, car les réactions auxquelles elle prend part sont localisées dans la partie du circuit comprise entre les rhéophores ainsi que le prouve l'équivalence chimique des quantités décomposées ; donc par voie d'exclusion on arrive à dire que la substance en circulation est impondérable. D'un autre côté; après une réaction chimique la constitution des corps est altérée : et on dit communément qu'ils sont décomposés ; de telle sorte qu'il survient des changements d'intensité dans leur pouvoir réfringent, leur densité, leur conductibilité, c'est-à-dire dans toutes les propriétés que les phénomènes optiques nous ont appris être dépendantes d'un changement du régime de l'éther intérieur. Par suite, rien de plus rationnel que d'admettre le passage de l'éther dans le fil rhéophore, à l'intérieur duquel il s'écoule comme dans un canal afin de donner naissance à une nouvelle constitution chimique des corps et à de nouvelles et différentes atmosphères éthérées. Donc l'impondérable en mouvement à l'intérieur du fil interpolaire d'une pile n'est autre que l'éther lumineux renfermé dans tous les corps.

Transport des éléments.

Ajoutons encore que dans l'action chimique de la pile il y a un autre phénomène qui conduit à la même conclusion : c'est le transport des éléments. C'est une action où la *tension* joue un rôle tout spécial. Or on ne peut expliquer pourquoi deux corps sont électrisés avec tension après l'action du courant, sans admettre que l'un est positif par rapport à l'autre, c'est-à-dire avec un excès d'éther, que cet éther excédant lui soit essentiel ou qu'il lui soit accidentel. Ce que nous disons des électrodes doit se dire de chaque couple qui lance dans le conducteur une portion de l'éther qui se dégage des combinaisons chimiques, où chaque élément, en se dissociant, prend un état électrique différent de l'autre.

Ainsi, en analysant les phénomènes de l'électrolyse, on est conduit à admettre un courant éthéré.

Courants produits par la chaleur.

Comme confirmation de cette théorie, on peut citer encore d'autres faits, et avant tout le développement des courants thermo-électriques. Toutes les fois qu'une source de chaleur est appliquée à un système de corps hétérogènes, elle dilate, elle agite la matière pondérable, et, par suite, trouble nécessairement l'équilibre de l'éther, le dilate; alors prend naissance une circulation dirigée dans un sens ou dans un autre, suivant que le permet la structure intime du corps, telle est l'origine des courants thermo-électriques. Une semblable dilatation de l'éther doit âvoir lieu encore durant les réactions chimiques, à cause du trouble survenant lorsque des masses différentes se réunissent pour former un nouveau composé, et cet effet expansif aide beaucoup au mouvement de l'éther dans la direction que détermine le nouvel état d'équilibre, succédant à la combinaison. La facilité avec laquelle se produisent les courants prouve encore la même chose.

Courants électro-magnétiques.

Lorsqu'on voit dans des conditions très-diverses d'aussi faibles influences développer des courants énergiques, il est impossible d'attribuer ces courants au mouvement de la matière pondérable désagrégée, et il faut y voir un transport d'une substance beaucoup plus mobile. Est-il admissible, en effet, que la matière pesante puisse être désagrégée par le retournement d'un barreau de fer ou d'une bobine en présence d'un aimant? Non certes, et cependant, par cette simple manipulation, des courants électro-magnétiques très-intenses sont développés. Ces courants consistent donc en un mouvement d'une matière préalablement très-atténuée, autrement dit d'un fluide qui toujours accompagne la matière grossière.

Genèse du courant.

La notion la plus nette qu'on puisse se former de la genèse du courant est la suivante. Toute cause qui trouble la constitution moléculaire, soit lorsque les corps mêlés les uns avec les autres se combinent chimiquement, soit lorsqu'ils subissent une modification thermique, mécanique ou autre, trouble du même coup l'équilibre de l'éther intérieur. Ce peut être une variation du volume ou de la densité, ou encore de la masse de l'éther intramoléculaire, comme cela arrive au moment d'une combinaison. Le régime éthéré se trouve ainsi modifié, une nouvelle distribution a lieu dans chaque molécule du corps, et, par suite, une partie de l'impondérable passe dans le fil conjonctif qui joue le rôle

d'un canal de décharge. L'éther mis en mouvement possède nécessairement une partie de la force vive qui l'a ébranlé, il transporte cette même force vive, et devient par là capable d'agir contre les obstacles qu'il rencontre, soit en agitant les masses jusqu'à les rendre incandescentes, ou les volatiliser, soit en détruisant les groupes chimiques, et ce dernier travail s'exécute le plus souvent par le même mécanisme qu'une dissociation par voie calorifique. Si on nous demande quelle est la cause première qui pousse ce courant, nous dirons que c'est la même qui produit l'action chimique.

Par conséquent, la force vive excitée dans une section du circuit par voie chimique, thermique ou mécanique, par le moyen de l'éther circulant, se transmet à une autre section sous l'une ou l'autre des mêmes formes de mouvement, d'après la disposition donnée à cette section ; c'est l'éther qui est le véhicule de cette action et qui joue ainsi le rôle de la vapeur dans les machines à feu, lesquelles, suivant leur disposition, servent tantôt à mouvoir des masses, tantôt à les désagréger, etc. Envisagé à ce point de vue, le courant rentre dans l'ordre des agents matériels employés à transformer les forces moléculaires en travail mécanique; sa prétendue immatérialité se trouve réduite à néant, et avec elle toutes les difficultés que soulevait une semblable interprétation des faits.

En résumé, dans l'action électro-motrice il faut distinguer deux choses fondamentales : 1° l'action extérieure qui cause la rupture de l'équilibre ; celle-ci est dans la pile l'action chimique ; dans les métaux, la chaleur, ou le magnétisme, ou l'action mécanique dans les isolants ; 2° la disposition intérieure qui détermine la direction du flux, et qui dépend de la constitution éthérée des éléments mis en présence. **Conclusions**

Mais, dira-t-on peut-être, nous *matérialisons* trop l'agent électrique, en en faisant une espèce de fluide ordinaire, tandis que communément on lui reconnaît des propriétés toutes différentes, et que même il est considéré par beaucoup comme une *force*. A quoi nous répondrons que nous ne craignons jamais de suivre les faits jusqu'où ils nous conduisent. Si l'éther est une matière, pourquoi échapperait-il aux lois mécaniques de la matière? Pour **Objection résolue.**

ceux qui font de l'électricité une *force*, ils entendent sans doute par là un agent immatériel[1], auquel cas, de deux choses l'une, ou c'est une substance d'un ordre de choses en dehors de la matière, ou c'est une fiction de l'imagination. Pour nous, on le sait, force *est cause de mouvement*, et telle est (quoique non pas exclusivement) toute matière animée de mouvement, et par cela l'éther en mouvement est une force. Ainsi nous ne nions pas que l'électricité soit une force en avouant sa matérialité.

Sans doute les propriétés toutes spéciales que nous supposons appartenir à l'éther soulèvent quelques difficultés; toutefois elles ne se rapportent pas au courant, mais plutôt à l'état de l'impondérable dans les corps isolants. Ces difficultés sont du reste pareilles à celles qu'on rencontre dans la théorie de la lumière : chose facile à voir lorsqu'on rappelle le parallèle que nous avons déjà établi dans le livre II, chapitre dernier, entre les deux genres de phénomènes, et qu'il ne sera pas mal de résumer ici en le complétant.

Parallèle entre la lumière et l'électricité.

Au point de vue de l'électricité, les corps se partagent en deux classes : celle des isolants et celle des conducteurs. Dans la première, on compte les substances diaphanes ou plus généralement celles qui font éprouver à la lumière la polarisation rectiligne; dans la seconde, les métaux, c'est-à-dire les substances qui polarisent la lumière elliptiquement. Une telle relation n'est pas accidentelle. Tandis que les premiers laissent passer les vibrations transversales, ils empêchent les mouvements dans le sens longitudinal; et, au contraire, les autres livrent passage aux mouvements longitudinaux et arrêtent les transversaux, de telle sorte qu'ils sont opaques.

Les isolants présentent une espèce de mobilité singulière de l'éther dans les divers sens d'où vient leur propriété de se constituer à l'état de tension sous l'influence des agents mécaniques ou chimiques, c'est-à-dire d'accumuler l'éther à leur surface sans que l'effet de ces actions pénètre à l'intérieur. Les conducteurs, dans les mêmes conditions, donnent naissance à un courant.

[1] M. Hirn dont nous admirons les beaux travaux sur la chaleur, a imaginé pour les forces des entités qui ne sont ni esprit ni matière, c'est-à-dire quelque chose qu'il nous est impossible de concevoir. Il est regrettable qu'un homme si habile ait introduit dans la science ces nébulosités.

Les conditions de l'éther que renferment les corps de la première classe ne sont donc pas de même ordre que celles de l'éther des corps appartenant à la seconde. D'autre part, il est impossible de soutenir que ce n'est pas le même fluide qui ici s'accumule en *tension* et là se transporte sous forme de *courant*. Si bien que, d'après l'ensemble des faits, ce qui agit, ce n'est ni l'éther seul, ni la matière pesante seule, mais les deux ensemble.

Nul corps n'est parfaitement conducteur, et nul n'est parfaitement isolant ; seulement dans les uns la mobilité est plus grande que dans les autres. Pour nous représenter les choses, nous avons dit qu'à l'intérieur des isolants ou des diaphanes, l'éther a une constitution comparable à celle qui appartient habituellement aux solides, tandis qu'il a celle d'un fluide à l'intérieur des métaux; autrement : dans ces derniers corps l'éther a une élasticité qui peut être très-facilement vaincue, tandis que le contraire a lieu dans les isolants et les diaphanes. Dans le vide absolu, l'éther conserve les mêmes propriétés que dans les diaphanes.

Cette propriété de l'éther dans le vide s'accorde parfaitement avec tout ce que la théorie de la lumière nous a appris relativement à ce milieu. Les vibrations transversales étudiées en optique nous montrent dans l'éther des forces de même nature que celles qui résident dans les diaphanes homogènes. Ainsi, par son mode vibratoire, l'éther se rapproche bien plutôt des solides que des fluides; mais cela ne doit pas être rapporté à un effet de cohésion entre ses atomes. Cela tient à ce que les rotations dont sont animés ses atomes, pendant qu'elles se prêtent à la propagation longitudinale du choc pour ce qui regarde la communication du mouvement de couche en couche, obligent, d'autre part, les oscillations des atomes mêmes à s'accomplir transversalement ; par suite, la translation linéaire des atomes ne peut s'accomplir avec une complète liberté dans le sens longitudinal suivant la direction du choc.

Mode d'agir de l'éther dans le vide.

Ainsi les travaux entrepris dans deux branches très-éloignées de la physique, nous amènent à une conclusion identique relativement à la structure des corps. Les corps sont formés non-seulement par la matière pondérable et sensible, mais aussi par une matière subtile dont la distribution n'est pas la même dans tous,

et qui n'a pas une égale mobilité dans les deux classes que nous avons distinguées plus haut. C'est cette matière que nous avons nommée éther, c'est elle qui en vibrant donne naissance à la lumière, et qui, en se transportant à travers les conducteurs, constitue les courants électriques.

Objection.

On nous objectera que l'identité de l'électricité et de l'éther lumineux est une hypothèse toute gratuite, que rien n'empêche de regarder la supposition contraire comme étant l'expression de la réalité. Mais alors il serait nécessaire d'admettre un éther lumineux et un éther électrique ; or un coup d'œil jeté sur l'ensemble des phénomènes apprend bien vite qu'une semblable distinction est fort peu rationnelle.

Résolution.

Ampère et Fresnel.

Par une heureuse coïncidence, à l'époque où Ampère s'occupait de recherches électro-dynamiques, Fresnel s'illustrait par de belles découvertes en optique, et ces deux grands génies arrivaient, chacun de son côté, par des voies différentes, à conclure que l'éther lumineux ne pouvait être autre que l'électricité [1]. Seulement Ampère, encore sous le joug de la terminologie de Dufay, disait : « Ce fluide est le résultat de la réunion et de la neutralisation des deux fluides électriques. » En faveur de cette assimilation, il faisait valoir comme argument principal que les actions électrique et magnétique s'exercent à travers le vide, et que par suite il est impossible d'admettre un fluide autre que l'éther lumineux. De plus, à son avis, les propriétés optiques de l'éther expliquaient parfaitement la transmission du magnétisme. En effet, d'après Fresnel, les mouvements excités dans ce fluide s'y propageaient par une sorte de frottement des couches déjà en mouvement sur celles qui ne l'étaient pas encore ; or un tel frottement devait déterminer des rotations, et par là les phénomènes électro-magnétiques. « Ces considérations conduisent même, dit Ampère, à admettre l'attraction entre les courants qui vont dans un même sens et la répulsion entre ceux qui sont dirigés en sens contraire [2]. » Cependant on ne connaissait pas encore, ni la polarisation rotatoire magnétique de la lumière, ni l'induction produite par les courants et les aimants, ni les lois des courants en rela-

Éther unique.

[1] Ampère, *Recueil*, etc., p. 215.
[2] Ampère, *Recueil*, p. 215.

tion avec la température, phénomènes qui jetèrent une grande lumière sur ce problème.

Composante longitudinale.

Les physiciens qui sont venus après Fresnel, admettant les vibrations transversales de l'éther pour la lumière, ont cherché ce que devenait la composante longitudinale du choc, et ils ont rencontré de grandes difficultés. Mais il est évident que celle-ci est employée à la communication même de cette espèce de glissement d'une couche à l'autre dont parle Ampère. Il paraît qu'on a confondu la translation effective des molécules, qui forme l'oscillation ou vibration, avec la pression et la communication du mouvement de tranche en tranche, qui peuvent se faire sans mouvement de transport du corps intermédiaire, soit par les propriétés des corps élastiques, comme dans les billes d'ivoire, soit par le moyen des rotations. L'électricité, étant une translation, ne pourra se propager en général là où se propage la lumière, et *vice versâ*. Le courant admettant une translation, de là dérive la possibilité des condensations de l'éther.

L'éther existe dans les métaux.

Nous avons reconnu effectivement l'existence de l'éther lumineux dans tous les corps, même dans les métaux, ainsi que le prouve leur transparence lorsqu'ils sont réduits en lames minces. Pour ces derniers, il faut admettre que, pris dans une grande épaisseur, ils ne transmettent plus le mouvement transversal, non parce que l'éther manque, mais à cause de leur structure moléculaire spéciale qui ne se prête pas à la propagation de ce genre de vibration. En effet, une feuille mince est parfaitement diaphane; lorsqu'on la comprime, sa masse et sa nature ne changent pas ; cependant elle devient opaque, mais reprend sa transparence lorsqu'on la chauffe. Les métaux polarisent la lumière elliptiquement, par réflexion et par transmission; cela ne montre-t-il pas encore une certaine mobilité du milieu, de telle sorte que la réflexion s'accomplit à peu près comme à la surface d'un milieu fluide et mobile (telle est, par exemple, le ricochet d'une pierre lancée sur l'eau) permettant la pénétration partielle d'une des composantes du rayon sous une certaine obliquité, circonstance qui ne se rencontre que dans une proportion tout à fait insensible dans les corps vitreux. Le résultat d'une telle mobilité est l'extinction du mouvement transversal, lequel, dit Fresnel,

Cause de leur opacité.

suppose l'éther extrêmement peu compressible, et même à peu près incompressible[1].

Mobilité de l'éther dans les métaux.

La mobilité de l'éther à l'intérieur des métaux est loin d'être une pure hypothèse; elle est démontrée par leur conductibilité pour la chaleur, laquelle dérive certainement de cette mobilité, par la facilité avec laquelle leurs particules changent de place et conservent la forme qu'on leur fait prendre forcément : preuve que leurs molécules pondérables sont capables de glisser les unes sur les autres sans cesser de rester unies mutuellement. La facilité avec laquelle se déplacent les molécules pesantes n'est pas seulement partagée par l'éther qui les enveloppe, mais elle doit s'étendre un peu plus loin, de telle sorte que les particules du corps se peuvent décharger très-aisément les unes sur les autres de l'excès d'éther que leur apporte quelquefois une cause extérieure, et *vice versâ*, ils peuvent le reprendre lorsqu'au contraire leur quantité naturelle d'éther vient à diminuer; de là leur force conductrice. Un fait intéressant, c'est que la conductibilité d'une substance dépend de sa structure moléculaire, et non de sa nature : ainsi le charbon isole à l'état de diamant et conduit à l'état de graphite; par conséquent, la constitution moléculaire a plus d'influence que la constitution chimique sur ce qui constitue la facilité du mouvement de l'éther à l'intérieur des corps.

L'éther existe donc dans tous les corps et les pénètre tous; seulement il faut admettre qu'il ne présente pas dans tous la même mobilité, et une telle hypothèse est de beaucoup préférable, au point de vue de la simplicité, à celle qui reconnaît l'existence d'un éther lumineux et d'un éther électrique.

nutilité de deux éthers.

Que l'on ne croie pas, du reste, que l'hypothèse de deux éthers fasse disparaître toutes les difficultés; bien au contraire, elle en soulève de plus sérieuses. Par exemple, il faut admettre que, lorsqu'un corps par sa combinaison avec un autre devient isolant (tel le plomb avec la silice), l'éther électrique mobile dans le métal devient immobile dans la combinaison isolante (le verre). ou bien qu'il s'échappe pour laisser la place à l'éther lumineux.

Il faut encore supposer que, dans tout métal qui se transforme

[1] Ampère, *Recueil*, p. 215.

en sel, pénètre une nouvelle quantité d'éther électrique, d'où résulte une rupture d'équilibre dans les corps environnants, de telle sorte que l'on pourrait avoir de l'électricité négative sans électricité positive, et ainsi de suite... Voilà, certes, des hypothèses sur lesquelles il est inutile de s'arrêter, car il suffit de les énoncer pour en faire voir toute l'absurdité.

L'hypothèse d'un éther unique dont la mobilité dans l'intérieur de certains corps n'est pas partout la même est donc la plus simple de toutes; et si au moment où elle a été présentée pour la première fois elle paraissait arbitraire, il ne peut en être ainsi maintenant que l'on a vu l'ensemble des faits sur lesquelles elle s'appuie.

Phénomènes de la translation éthérée.

L'existence d'un milieu universel une fois reconnue expérimentalement, on ne devrait plus éprouver de difficultés à prévoir les effets qu'il peut produire, non-seulement quand il est mis en simple vibration entre ses limites d'élasticité, mais aussi lorsque ces limites sont excédées, et qu'il y a une véritable translation. Malheureusement, l'imperfection des théories hydrodynamiques est si grande, qu'il est impossible d'arriver par cette voie à interpréter tous les faits. Aussi Ampère a-t-il préféré prendre exclusivement des faits expérimentaux comme base de calcul, et nous-même, malgré le grand nombre de phénomènes découverts depuis lors, nous sommes obligé, pour rendre compte des phénomènes, de procéder par analogie, et de les comparer à ceux que nous présentent les fluides ordinaires.

L'éther est sujet aux lois hydrodynamiques.

De cette façon, on reconnaît bien vite que de grandes ressemblances existent entre ce qui se passe dans les conducteurs de l'électricité et les propriétés des fluides en mouvement : 1° lorsque l'électricité se propage dans des fils télégraphiques d'une grande longueur, l'état initial représente parfaitement ce qui arrive dans les fluides, et par le front de courant qui appartient au flux électrique au moment où il envahit le fil, et par les espèces d'ondes qui succèdent à l'ouverture et à la fermeture du circuit; 2° on retrouve dans le courant électrique le phénomène caractéristique des fluides, qui est le choc exercé par la force vive de la masse en mouvement dans les tuyaux, lequel donne naissance au coup de bélier qui constitue ici certains phénomènes d'induction. Ces mêmes phé-

Induction dynamique.

nomènes nous font encore rapprocher deux phénomènes complémentaires, la tension et le courant, et par là nous arrivons à comprendre mieux ce qu'est la tension ; car, de même que l'arrêt d'un courant liquide donne lieu à une pression se faisant sentir tout d'un coup contre les parois des tubes; de même, toutes les fois que l'on interrompt le courant électrique, on développe une pression statique qui produit une tension positive là où il y a condensation d'éther, et une négative là où il y a dilatation : la bobine de Rhumkorff nous donne un exemple frappant de ce fait ; 3° enfin d'autres phénomènes de l'induction électro-dynamique ne sont qu'un cas particulier des phénomènes découverts par Venturi touchant la diminution de pression dans les liquides en mouvement et la communication des mouvements latéraux. Au moment où le courant commence, il se fait une diminution de pression dans le conducteur, ce qui oblige l'éther extérieur à prendre un nouvel équilibre et à donner ainsi naissance, au moment ou il s'établit, à des courants passagers, et au moment où il finit au choc en retour.

Ces faits achèvent de prouver la matérialité de l'éther, et la manière très-simple dont ils se déduisent des principes mécaniques qui régissent les mouvements des fluides permettent de ne point faire intervenir ni les polarisations, ni les actions transversales, ni toutes ces forces que l'on imaginait aussitôt que le besoin s'en faisait sentir.

Nous ne nous abusons pas jusqu'au point de croire que l'application des principes d'*hydrodynamique* soit également facile dans *tous les cas particuliers*, mais nous dirons que les difficultés que l'on rencontre alors sont de l'ordre de celles qui nous arrêtent bien souvent lorsqu'on applique ces mêmes principes aux fluides ordinaires. La science se trouve ainsi débarrassée de cette quantité innombrable de fluides qui autrefois encombraient toutes les branches de la physique : fluide calorifique, fluide lumineux, fluide électrique positif et électrique négatif; fluide magnétique austral et boréal, tout cela devient inutile, tout s'explique par le mouvement d'un fluide unique, l'éther.

Simplification de la science.

Et parce que d'illustres physiciens répugnent à admettre l'éther, on ne doit pas en arguer contre l'hypothèse éthérée; car, il faut

l'avouer, en science comme en tout, chaque âge a sa mode, et l'aversion que montrent aujourd'hui certains physiciens à admettre un seul fluide, contraste étrangement avec la facilité qu'on mettait, il y a peu de temps, à accepter les fluides, quelque nombreux qu'ils fussent. Du reste, si, pour faire prévaloir une doctrine, il suffisait de l'autorité des hommes remarquables qui l'ont soutenue, nous pourrions citer parmi les défenseurs de la théorie éthérée plusieurs savants dont la réputation ne le cède en rien à celle de ses adversaires [1].

Attractions et répulsions.

Et il n'y aurait rien d'étonnant à ce que, dans la suite, les mouvements de l'éther nous donnent la raison première d'un grand nombre de phénomènes tout autres que ceux dont ils nous donnent actuellement l'explication. Car un agent répandu partout doit produire des effets extrêmement variés, soit quand il *presse*, soit quand il se *transporte*. Nous avons cherché à expliquer par son intervention les réactions qu'exercent à distance l'un sur l'autre, soit deux corps, lorsqu'à la surface de l'un le fluide est condensé et raréfié sur l'autre, soit deux conducteurs à travers lesquels l'éther est en circulation. En un mot, nous avons cherché si, au moyen de l'éther, il est possible de rendre compte des attractions et des répulsions électro-statiques et électro-dynamiques.

L'attraction conséquence d'une pression.

Quant aux attractions électro-statiques, la question peut être considérée comme résolue indirectement par ce seul fait, que les attractions et les répulsions s'exercent seulement lorsque les corps présentent cet état qui équivaut à la pression, et que les phénomènes d'induction nous montrent être causés par une accumulation du fluide impondérable pour l'état dit positif, et par une soustraction pour l'état dit négatif. Par conséquent, on ne peut faire difficulté sur le principe que toute attraction est un effet de tension ; mais il reste à déterminer par quel mécanisme un changement ou

[1] Outre les travaux bien connus de Lamé, Cauchy et de Verdet sur l'optique, on peut voir ceux de Maxwell qui traitent du magnétisme dans l'hypothèse des petits tourbillons; seulement cet auteur nous semble ajouter une complication inutile en admettant des espèces de cellules formées par le fluide électrique. Tout dernièrement aussi, Tyndall n'a pas hésité à se ranger parmi ceux qui envisagent le courant électrique comme un courant d'éther. Depuis la première édition de cet ouvrage, l'état des opinions est remarquablement changé. Nous sommes heureux de ne devoir rien changer au texte primitif.

une rupture d'équilibre dans la pression donne naissance aux mouvements attractifs à travers les milieux isolants et le vide.

La question limitée au cas des corps isolants se résout aisément. Étant connu par les phénomènes lumineux et électriques que le mouvement de l'éther à l'intérieur de ces corps est fort gêné il devient facile de comprendre comment des différences de tension et de densité peuvent s'y établir, de même que cela arrive dans les solides ordinaires soumis à des pressions mécaniques extérieures. Or les phénomènes d'induction moléculaire que présentent les isolants sont de simples effets de différence de tension intérieure, c'est-à-dire de pression, comme l'on dit en parlant des fluides.

Les attractions dans les milieux isolants résultent donc de ce que les pressions intérieures tendent sans cesse à l'équilibre, et il arrive souvent que l'éther dans ses mouvements entraîne la matière pesante. Les difficultés sérieuses surgissent lorsqu'on cherche à expliquer comment les répulsions se peuvent exercer à travers le vide, c'est-à-dire dans l'éther libre, milieu auquel les considérations précédentes semblent ne pouvoir s'appliquer. Mais en réalité les complications ne tiennent pas à la nature du problème ; elles sont le fait des théoriciens qui veulent donner à l'éther libre les attributs des autres fluides, et spécialement la propriété de transmettre le choc moléculaire dans tous les sens avec la même intensité. Heureusement que les phénomènes optiques nous aident à sortir de cette fausse voie, en nous montrant qu'au sein de l'éther libre les mouvements de transport ne se font pas avec une égale facilité dans toutes les directions, et qu'il existe des causes qui forcent les oscillations à devenir transversales. Ce seul fait nous montre clairement que la théorie des fluides ordinaires ne convient pas au fluide éthéré, parce qu'elle est fondée sur l'égalité parfaite de la transmission du choc dans tous les sens. Il n'est donc pas impossible qu'à l'intérieur de l'éther libre une différence de densité puisse s'établir d'une couche à l'autre comme dans les diaphanes. Ajoutons que la condensation et la raréfaction de l'éther à la surface des corps isolés est inséparable d'une activité plus grande de vibration sur cette couche, et par là peut aussi se produire à une grande distance dans l'éther ambiant un nouvel état d'équilibre forcé.

Ainsi la structure de l'éther, telle qu'elle nous est révélée par l'optique et l'électricité, nous place sur la voie d'expliquer les attractions, de quelque nature qu'elles soient, sans recourir aux entités dynamiques agissant à distance, ainsi que quelques-uns ont essayé de le faire.

Étant admis que sous l'influence d'une pression exagérée d'éther à la surface d'un corps, des différences de densité peuvent aussi prendre naissance dans les couches environnantes de l'éther libre, il s'ensuit forcément que les corps chargés d'éther en plus ou en moins ont autour de leur surface un état d'équilibre forcé qui persiste jusqu'à ce que par quelque moyen les choses retournent à l'état naturel, et alors le transport ou le déplacement des masses pesantes est un des moyens par lesquels l'équilibre peut se rétablir. Lors donc que les masses pondérables présentent des conditions convenables de mobilité, elles peuvent être entraînées l'une vers l'autre pour faciliter ce rétablissement d'équilibre. De là les attractions et les répulsions statiques. Enfin quelquefois, par sa force expansive, l'éther peut entraîner les parties constitutives des corps, et ainsi les désagréger.

Ainsi donc l'action statique de l'électricité dépend : 1° d'une condensation ou raréfaction anormale d'éther, formée par une cause quelconque à la surface d'un corps; et 2° d'une modification correspondante dans le milieu environnant qui se trouve par là aussi dans un état anormal et forcé. Les phénomènes d'induction nous ont prouvé l'existence de la première de ces conditions; la manière dont le milieu est modifié par elle de façon à pouvoir produire une attraction, sera développée dans le chapitre II du livre suivant. Nous verrons que l'action de l'éther condensé est différente de celle de l'éther simplement agité : ceci produit seulement une vibration passagère qui ne dépasse pas la limite de l'élasticité : l'éther condensé peut déplacer la masse et produire une différence de pression permanente et se propageant à distance autour du corps, d'où s'ensuivent les attractions.

Attractions et répulsions dynamiques.

Considérons maintenant la seconde classe des actions à distance, celle des actions électro-dynamiques et magnétiques, nous trouvons qu'elles se réduisent encore à des modifications du milieu universel. En effet, elles peuvent s'expliquer en tenant compte

à la fois de la diminution que subit la pression de l'éther dans un conducteur au moment où il est traversé par le courant, et de la composition des chocs réciproques des atomes de l'éther qui enveloppe les conducteurs : les atomes composant les couches voisines des conducteurs, par un effet de communication de mouvement latéral, conçoivent des mouvements rotatoires et se constituent en tourbillon : une fois ces rotations développées dans l'éther, les réactions réciproques des aimants et des courants s'en déduisent naturellement d'après les règles de la composition des mouvements rotatoires.

Généralité du magnétisme

Envisagé de la sorte, le magnétisme n'est plus une force spéciale, mais un agent universel, et ses actions se confondent avec celles de l'éther, fluide qui pénètre tout. Par conséquent, les effets singuliers excités par le magnétisme dans les corps, et distingués par des noms divers, sont tous de même ordre, et leurs différences résultent seulement du sens des rotations qui deviennent prédominantes par l'effet du courant. Ainsi, les mêmes rotations donnent naissance à des mouvements opposés, suivant que les tourbillons moléculaires sont faciles à orienter ou non, et cela fait que les corps sont magnétiques ou diamagnétiques. Dans les métaux en mouvement, le tourbillon éthéré accuse sa présence en leur faisant éprouver une résistance très-grande, accompagnée d'un développement d'électricité dynamique et de chaleur, comme cela arrive avec les fluides ordinaires en mouvement. Le courant est encore l'intermédiaire par lequel la force mécanique se transforme en chaleur, soit à l'intérieur des corps mis en rotation entre les pôles d'un aimant, soit dans les machines électro-magnétiques, nous trouvons ici la réciproque du développement par la chaleur d'un courant employé à entretenir l'activité d'une machine.

Ainsi, tous les phénomènes magnétiques et électriques prennent leur origine dans le mouvement et s'y résolvent. La seule différence à établir entre les mouvements de l'éther et ceux que l'on étudie en hydrodynamique réside en ce que, dans ceux-ci, un fluide sensible et pondérable entre en jeu, tandis que dans ceux-là le fluide en action échappe à nos sens, parce que, pénétrant tous les corps, il est incoercible.

Dans quelques cas, l'éther paraît jusqu'à un certain point

susceptible de se condenser ou de se raréfier, et alors il trahit pour ainsi dire son activité en produisant des effets semblables à ceux de la force *qui tire les poids*. Nous pouvons donc inférer de là que, s'il est impondérable, c'est parce que lui-même est capable de produire des mouvements de même ordre que ceux causés par la gravité. Cela nous porte à soupçonner que cette force mystérieuse, la gravitation, pourrait bien être un résultat de la présence et de l'action de l'éther dans l'espace, hypothèse qui, par cela seul qu'elle est probable, mérite l'examen ; aussi le ferons-nous dès que nous aurons pris une connaissance plus approfondie de la constitution de la matière.

Analogie avec la gravité.

En conclusion, *le même éther est la cause des phénomènes lumineux et des phénomènes électriques, mais dans les premiers il agit en vibrant, dans les seconds en se déplaçant. Ce déplacement se manifeste surtout dans son association avec les molécules de la matière pondérable et lorsque l'ébranlement excède les limites d'élasticité : enfin toute modification de la matière entraîne une rupture d'équilibre de l'éther qui pour se rétablir est obligé à se constituer en courant : si le courant est empêché, il en résulte une tension.*

LIVRE IV

CONSTITUTION DE LA MATIÈRE

INTRODUCTION

Limites de notre discussion.

On se tromperait si, d'après le titre de ce dernier livre, on pensait que nous avons la prétention de dévoiler le mystère de la matière. Notre but est seulement de résumer ici ce qui a été dit dans les chapitres précédents, et d'appliquer les théories déjà établies à ceux des phénomènes qui pouvant s'y rattacher ont été laissés de côté jusqu'ici. Loin de songer à expliquer l'Univers, nous chercherons seulement à pousser notre induction aussi loin que possible. Si, dans les cas extrêmes, elle se trouve en défaut, cela ne portera aucune atteinte aux résultats acquis ou plutôt conquis par nos premières recherches, et, plein de confiance en l'avenir nous laisserons aux investigateurs qui nous succéderont, le soin de compléter l'œuvre commencée.

Difficultés.

Les difficultés grandissent à mesure que nous pénétrons plus avant dans la question, et que l'objet de nos spéculations s'étend davantage. Les forces étudiées jusqu'ici se révélaient à nous par des phénomènes, qui prennent leur commencement et leur fin dans un mouvement sensible ; aussi, bien que leur manière d'agir nous restât inconnue, par le raisonnement nous sommes arrivé à découvrir leur nature, sans rencontrer d'obstacles sérieux. Les forces, dont actuellement nous entreprenons l'examen, se comportent tout autrement : tantôt leurs effets se produisent sans qu'il soit en notre puissance d'en maîtriser les causes, ou de les modifier

dans le sens qui nous conviendrait le mieux ; telle est, par exemple, la gravité ; tantôt elles changent les propriétés des corps : telles sont les actions chimiques. Nous avons donc à résoudre le double problème de définir l'état antérieur des corps et d'expliquer le changement survenu ; il nous faudra faire des hypothèses aussi bien sur la manière dont s'accomplit la réaction, que sur l'état des parties qui y contribuent. Nous courons donc grand risque de ne pouvoir nous laisser guider par l'enchaînement des faits, ce fil conducteur grâce auquel jusqu'ici nous ne nous sommes pas égaré dans le dédale des phénomènes naturels. De plus, dans la nouvelle classe des phénomènes qu'il nous reste à examiner, un même fait se prête à plusieurs interprétations différentes, et il n'est point aisé de discerner quelle est la vraie.

Vu la difficulté du sujet, assurément nous ne parviendrons pas, malgré nos efforts, à traiter tous les points à l'entière satisfaction de nos lecteurs, et de nous-même. Nous croyons utile de faire cette réserve avant d'entrer en matière, afin que l'on ne nous accuse pas de forcer nos conclusions, et de donner pour certain ce qui est seulement conjectural. **Exception.**

Disons tout d'abord que notre intention est de considérer exclusivement la matière inorganique ; nous ne parlerons pas des phénomènes de la vie végétale, encore moins de ceux qui s'accomplissent dans les animaux où une autre substance associée à la matière en modifie les opérations, de telle sorte que souvent les effets observés diffèrent beaucoup de ceux que produirait la matière inanimée, abandonnée aux lois qui lui sont propres. C'est là un autre ordre de phénomènes dont l'examen ne rentre pas dans le cadre que nous nous sommes tracé. Cependant les êtres qui sont le théâtre de ces opérations spéciales n'échappent pas à l'influence des agents physiques ordinaires. Ainsi la chaleur est indispensable à la naissance et à la vie des êtres organisés ; sans la lumière, la plupart d'entre eux ne sauraient se développer, et sur tous elle exerce une action bienfaisante ; l'électricité est sans cesse mise en mouvement dans l'organisme, tant par l'effet des réactions chimiques que par les actes physiologiques. C'est donc seulement sous ce rapport que nous en parlerons.

CHAPITRE PREMIER

STRUCTURE DES CORPS. — IMPÉNÉTRABILITÉ, POROSITÉ, DIVISIBILITÉ. THÉORIE ATOMIQUE.

Faits fondamentaux déjà démontrés.

Des faits analysés dans les livres précédents ressortent les conséquences suivantes :

1° La matière est continuellement en mouvement, son agitation se manifeste sous la forme de calorique. C'est cette agitation et cette tendance à se diffuser provenant du mouvement qui constitue dans les molécules matérielles la force répulsive et désunissante, dont l'activité augmente à mesure que l'état d'isolement des molécules devient plus grand, et que les masses sont réduites à de moindres dimensions.

Éther dans l'espace.

2° Outre la matière palpable et sensible, existe, disséminée dans l'espace et dans les corps, une substance subtile qui directement échappe à nos sens, mais dont nous percevons très-nettement les effets à cause des modifications qu'elle imprime à la matière pesante. Cette substance se manifeste à nous spécialement sous la forme des mouvements nommés radiations. Sa matérialité et son inertie sont démontrées par l'échange de travail qui s'accomplit souvent entre elle et la matière pesante.

Éther dans les corps.

3° Au sein des corps pondérables se manifeste un autre genre de mouvement; c'est celui d'une matière extrêmement subtile, qui tantôt coule comme un fluide, tantôt s'accumule en tension à leur surface, ou, pour parler plus exactement, s'accumule en tension là où existe une discontinuité de faculté conductrice entre deux substances, tension qui augmente quelquefois jusqu'à ébranler et désagréger les molécules. La matière en question pénètre tout ; elle concourt à la formation de tous les corps, si bien que, quoiqu'on l'appelle d'un autre nom, on doit cependant la regarder comme n'étant autre que l'éther. Il est complétement inutile d'imaginer deux espèces de matières subtiles pour expliquer les différences, qui, sous le rapport des propriétés optiques et électriques, séparent les substances en transparentes ou isolantes, et opaques ou

conductrices, car ces différences tiennent non à une diversité de nature, mais à l'état d'agrégation qui donne aux unes la faculté de propager les mouvements dans le sens transversal, et aux autres dans le sens longitudinal[1]. Enfin, les changements d'équilibre dans l'éther déterminent souvent l'agitation de la matière pesante : de là les attractions et les répulsions électriques.

Extension de ces principes

Demandons-nous maintenant si les principes à l'aide desquels, jusqu'ici, nous avons expliqué un grand nombre de phénomènes naturels, sont encore applicables aux autres forces qui gouvernent la matière, savoir la cohésion, l'affinité chimique et la gravitation. Déjà, dans le cours de cet ouvrage, nous avons esquissé quelques vues théoriques relativement à ces questions délicates, mais c'étaient de simples conjectures qu'il nous faut maintenant développer et soumettre à une analyse critique. En premier lieu, examinons la valeur d'une hypothèse qui, pour n'avoir pas été formulée nettement jusqu'ici, a été cependant admise d'une manière implicite : la matière est-elle ou non formée de particules discontinues?

Impénétrabilité de la matière.

Les corps d'après leurs caractères les plus essentiels, se présentent à nous comme un ensemble de *forces*. La principale, la plus fondamentale de toutes ces forces, est celle de résistance ou d'impénétrabilité ; c'est elle qui, entrant en jeu toutes les fois qu'un corps change d'état, ou qu'il passe du repos au mouvement, ou du mouvement au repos, en manifeste l'*inertie*. Lorsque cette force agit dans une *étendue figurée*, elle définit à proprement parler un *corps*. Les physiciens regardent les objets comme une réalité extérieure, et admettent comme un fait la communication du mouvement d'un corps à un autre par le contact au moins apparent. Nous disons *apparent*, car nous n'ignorons pas que quelquefois les corps dans le choc se déplacent, même lorsqu'ils restent à distance quelquefois mesurable. Ainsi une boule de verre peut déplacer un plan de la même substance lorsque des anneaux colorés sont encore visibles, et, qu'au centre, il n'y a pas de contact absolu. Nous ne discuterons pas ici les causes de ce phéno-

Communication du mouvement.

[1] Une objection a été faite à cette division : les verres noirs sont isolants et ne transmettent pas le courant, donc elle est incomplète. La réponse a été depuis longtemps donnée par Melloni, qui prouva que la chaleur obscure traverse les verres et les quartz noirs. L'opacité ne doit pas se limiter aux rayons qui affectent l'œil, mais à toutes les radiations.

mène, nous ne chercherons pas davantage si ce contact absolu est nécessaire, ni comment cela s'opère. Les physiciens ne se chargeront pas de résoudre ces questions en sens général, ni de savoir comment cela a lieu : ils veulent seulement réduire les autres faits à ce fait unique. Ainsi nous observons tous les jours des communications de mouvements qui en apparence se font à des distances considérables, comme, par exemple, la chute des corps, la circulation des planètes; le physicien se propose dès lors de réduire ces mouvements à ceux qui s'opèrent au contact, soit par l'intermédiaire de liens invisibles, soit par la poussée de fluides, etc. Quant aux nombreuses questions qui surgissent dans ce cas, sur la possibilité de cette communication du mouvement, sur cette transmission au contact absolu ou non, nous les considérons comme du ressort du métaphysicien[1]. Ainsi il n'appartient pas à la physique de décider si les éléments sont simples ou non; disons plus, cela lui importe peu. Que l'atome primitif soit impénétrable et occupe l'étendue d'une sphère solide de rayon défini, ou bien que ce soit un élément simple occupant le centre d'une sphère géométrique et agissant jusqu'à une distance de ce centre, de façon à produire l'impénétrabilité, pratiquement parlant les résultats sont les mêmes; de telle sorte que la physique n'a pas qualité pour trancher cette question, c'est affaire de métaphysique.

Porosité. Mais l'étendue occupée d'une façon sensible par le corps n'est pas réellement *remplie* tout entière de ce quelque chose qui le constitue que nous nommons matière, et dont nous mesurons la quantité par l'inertie, c'est-à-dire la masse. L'expérience permet dans plusieurs cas de rendre sensibles les lacunes considérables qui existent dans l'espace occupé par un corps, et, à défaut de l'observation, le raisonnement suffirait à prouver l'existence d'intervalles vides très-multipliés qui sont les *pores*. Un

Discontinuité des corps. corps est donc en réalité un ensemble discontinu, alors même

[1] Cette déclaration que nous avons déjà faite plus d'une fois, a sans doute échappé aux personnes qui, critiquant nos idées, nous ont objecté que, dans les communications du mouvement au contact, tout est *mystère*. Répétons-le donc encore une fois, nous acceptons la communication du mouvement au contact comme un fait, et si nous cherchons à y ramener la transmission s'effectuant, comme l'on dit, à distance, c'est parce que le premier mode est plus facile à concevoir que l'autre.

qu'il s'offre à nous avec une continuité parfaite en apparence. On ne possède aucune donnée certaine sur la grandeur de cet espace vide. Quelques physiciens comparant la densité de l'eau à celle du platine écroui, conclurent que dans l'eau le rapport du plein au vide devait être de 1 à 22 (Pianciani). Dans ces derniers temps, les travaux de Hirn sur la chaleur l'ont amené à admettre, que la valeur de ce rapport était au contraire de 10 à 1. La décision de ce point touche de trop près à la constitution des éléments de la matière, pour que nous puissions la donner en ce moment. Mais les changements de volume que les corps éprouvent sous l'influence de la chaleur étant dus au mouvement moléculaire, prouvent irréfutablement la discontinuité de la matière car il ne saurait y avoir mouvement des parties de la matière, si elle n'est pas discontinue. Les parties indivisibles et les pores des substances sont d'une telle ténuité qu'ils échappent complétement à nos sens; pour en donner une idée, nous rappellerons que les ondes lumineuses, jaunes, qui ont une longueur d'un demi-millième de millimètre, sont immensément plus grandes que les derniers éléments des corps. Dans certaines diatomées circulaires dont le diamètre égale la longueur de l'onde rouge, on peut compter sur cette ligne plus de cent cellules, dont chacune présente des étranglements et des renflements successifs, et est formée de parties renfermant un organisme *composé lui-même de molécules de diverses substances*[1]. D'autres végétaux et infusoires microscopiques ont une longueur moindre que celle d'une onde lumineuse, et cependant ils contiennent tous les organes nécessaires à leur nutrition et aux autres fonctions vitales.

Petitesse des atomes.

Comment douter après cela, qu'il est à jamais impossible de déterminer les dimensions des dernières parties de la matière. Nous sommes entre deux infinis, l'infiniment grand des espaces célestes et l'infiniment petit des distances atomiques. Par induction nous concevons les atomes réunis en systèmes moléculaires à l'intérieur des corps, d'après ce que nous voyons habituellement; et de même que dans le champ du télescope l'astronome voit une nébuleuse se résoudre en étoiles, dont chacune

[1] M. le comte Castracane a mesuré six mille cellules de l'*amphipleura pellucida* sur la longueur d'un millimètre !

est un soleil autour duquel circule un monde de planètes avec leur cortége de satellites, ainsi le microscope nous montre les molécules des corps formées d'agrégats et de systèmes atomiques d'ordre successivement plus élevé, bien que la proportion, entre les volumes des atomes et leurs intervalles, soit loin d'être la même que celle que nous observons entre les dimensions des mondes répandus dans l'espace infini, et les énormes distances qui les séparent. Ainsi notre œil nous fait défaut, malgré les puissantes ressources que l'optique met à sa disposition ; et le raisonnement est le seul moyen analytique que nous puissions utiliser.

Divers degrés de complication atomique.

Lorsqu'on considère les divers degrés de la condition physique de la matière, qui passe successivement à l'état solide, liquide, gazeux, on ne peut échapper à cette persuasion que les systèmes moléculaires sont plus compliqués dans les solides que dans les liquides, et plus dans ceux-ci que dans les gaz, enfin de moins en moins dans ces derniers à mesure qu'ils sont davantage raréfiés, sans toutefois changer de nature chimique. A la suite de la disgrégation physique, nous pouvons maintenant placer la dissociation chimique, régie par les mêmes lois que les changements d'état physique (H. Deville). Quand intervient ce mode de division, l'esprit se refuse à concevoir à quel degré de rareté la matière peut atteindre. Donc, il n'est pas étonnant que des écoles philosophiques aient regardé la matière comme constituée par une série de systèmes particulaires de plus en plus simples, autrement dit de fluides successivement plus atténués, sans qu'on puisse assigner de terme empirique à leur atténuation.

Cependant la raison nous dit que la matière n'est pas divisible à l'infini, que sa désagrégation doit avoir un terme : s'il est facile d'affirmer la continuité de la matière, il est impossible de concilier cette hypothèse avec les phénomènes du mouvement. Par suite, aussi éloigné qu'on suppose le dernier terme de l'atténuation de la matière, celle-ci est toujours en définitive formée de volumes discontinus. L'étude de la lumière et de l'électricité nous a conduit a regarder comme infiniment probable que l'éther n'est autre que la matière elle-même parvenue au plus haut degré de ténuité, à cet état de rareté extrême que l'on nomme état atomi-

Atomes de l'éther.

que. Par suite, tous les corps ne seraient en réalité que des agrégats, des atomes-mêmes de ce fluide.

Mais ce n'est là qu'une hypothèse, et rien n'empêche qu'il y ait deux ou même plusieurs espèces d'atomes primitifs, les uns qui constituent l'éther, les autres qui forment les corps pesants. Que l'on adopte cette manière de voir ou la précédente, toujours est-il qu'on est forcé de reconnaître les corps comme composés de molécules distinctes. Cette doctrine n'a rien que de très-rationnel, en outre elle découle spontanément de tous les faits observés ; cependant elle a été vivement attaquée, si bien que nous croyons nécessaire de montrer qu'elle est en parfait accord avec l'observation. L'examen optique et le toucher étant impuissants à nous donner les moyens d'asseoir notre décision, ce sera à la chimie qu'il faudra demander les données nécessaires pour établir nos raisonnements.

Théorie atomique des chimistes.

Quand les chimistes eurent reconnu que les corps hétérogènes se combinent toujours suivant des *proportions déterminées*, ils admirent bien vite que la matière était composée de corpuscules différents les uns des autres par le volume et par le poids ; lesquels se combinaient entre eux en nombre toujours très-simple et suivant des rapports peu nombreux, spécialement dans les combinaisons minérales inorganiques. Ces corpuscules furent nommés par la plupart des chimistes, atomes, et cela uniquement pour la simplification du langage, car ils regardaient leur division comme possible et ils se servaient du même mot pour désigner ceux qui manifestement étaient composés. Certains savants plus scrupuleux, voulant éviter l'antilogie des termes, abandonnèrent le nom d'atome et lui substituèrent celui d'*équivalent*, lequel était indépendant de toute idée théorique et représentait seulement le rapport des poids suivant lesquels les substances se combinent et *se substituent l'une à l'autre d'une façon équivalente*. Théoriquement l'équivalent défini et multiple n'est explicable qu'en supposant la matière composée de centres distincts et simples. Que ces centres soient physiquement divisibles ou non, toujours est-il que, pour nos moyens d'action, ils sont tout à fait insécables. On croit assez généralement que l'on outrepasse les justes limites de la théorie en s'élevant des équivalents aux atomes, mais c'est à tort ; le fait

Équivalents.

d'équivalence est purement une donnée expérimentale, et la constitution atomique est la déduction logique de ce même fait. L'expérience, qui a pu prononcer sur le premier point, ne pourra jamais rien décider relativement au second, parce que l'œil ne verra jamais les atomes, de même que les doigts ne les toucheront jamais. Du reste la loi des proportions définies n'est pas la seule qui mérite de fixer notre attention; et nous avons déjà dit (liv. I, ch. XIII), que la loi des chaleurs spécifiques prouve de la façon la plus péremptoire que, non-seulement les corps sont formés suivant des proportions définies, mais que leurs atomes élémentaires ont une capacité de mouvement thermique déterminée, et la même remarque convient encore aux équivalents électriques.

oi de Prout. Aux faits primitivement connus par les chimistes s'en sont ajoutés d'autres, découverts depuis peu, qui ont apporté un nouvel appui à la théorie atomique. C'est ainsi qu'un examen comparatif des poids équivalents des diverses substances conduisit le docteur Prout à les considérer tous comme des multiples de l'équivalent de l'hydrogène. La loi de Prout permettait de calculer les nombres proportionnels des corps simples avec toute l'exactitude qu'exigeaient les calculs de la chimie industrielle, et même ceux des analyses assez délicates. Mais Berzelius, déterminant à nouveau les poids des équivalents avec toute la précision qui caractérise son œuvre scientifique, reconnut que ces valeurs n'étaient pas exactement multiples les unes des autres. M. Stas serait arrivé dernièrement à la même conclusion.

Opinion de Berzelius et Stas. De là deux vues systématiques diamétralement opposées sur les conditions élémentaires de la matière[1]. Pour Berzelius, chacun des corps simples de la chimie minérale est un être distinct tout à fait indépendant des autres; les molécules des divers éléments n'ont d'autres propriétés communes que celles qui appartiennent à la matière en général, savoir : stabilité, immutabilité, inertie, etc., et il y aurait autant de matières distinctes que d'éléments chimiques. Or cette théorie elle-même peut, à la rigueur, conduire à assigner aux corps une constitution purement dynamique, c'est-à-dire à les envisager comme un agrégat de forces sans support matériel.

[1] Dumas, *C. R.*, t. XLV, p. 711, ann. 1857.

La relation trouvée par Prout permet, au contraire, de regarder les corps comme formés par la condensation d'une matière unique, l'hydrogène, par exemple, en supposant vraie l'exactitude de la loi et l'unité de poids bien choisie, ou autre élément dont l'hydrogène serait un multiple lui-même.

De plus, comme certains corps doués de propriétés différentes ont des équivalents égaux, on est conduit à admettre que des quantités égales de cette matière unique pourraient constituer des éléments de même poids, mais ayant des propriétés dissemblables, à cause de la diversité d'arrangement des parties constituantes. Quant aux corps, dont l'équivalent est multiple de celui d'un autre, ou égal à la moyenne des valeurs appartenant à deux autres, rien n'empêche de regarder leur molécule comme formée de deux demi-molécules de ces derniers.

Analogie avec les composés organiques.

Enfin, on reconnaît aisément que plusieurs équivalents minéraux peuvent être formés, suivant des lois semblables à celles trouvées pour les radicaux des composés organiques. De telle sorte que la théorie de Prout assimile les prétendus radicaux simples de la chimie inorganique aux radicaux organiques, dont la composition est parfaitement reconnue ; les premiers différant des seconds seulement par une stabilité infiniment plus grande, et résistant à cause de cela à tous nos procédés d'analyse.

La question ramenée à ces termes a été examinée par Dumas ; des expériences rigoureuses lui ont montré que la loi de Prout se vérifiait constamment, sauf deux exceptions présentées par le chlore et le cuivre; les nombres équivalents de ces deux corps simples sont fractionnaires, on trouve pour le chlore 35,5, et pour le cuivre, un nombre compris entre 31 et 32. On a signalé en outre des irrégularités dans l'équivalent de quelques autres substances, mais comme il s'agit là de corps très-rares, on peut croire à des erreurs d'expérience, tandis que dans le cas des deux corps simples, dont nous avons parlé, le doute n'est pas possible ; la loi de Prout est en défaut. Or l'illustre chimiste pense que ces anomalies n'autorisent pas à rejeter la loi ; elles indiquent seulement qu'il faut abaisser le poids pris comme unité, et modifier comme il suit la formule de Prout ; tous les corps simples ont un poids atomique multiple de celui d'un certain corps jusqu'ici in-

connu, et dont l'équivalent serait seulement 0,5, c'est-à-dire la moitié du nombre proportionnel de l'hydrogène. Ainsi la loi de Prout est vraie en elle-même, mais il convient de changer l'unité adoptée tout d'abord. Comme il est peu probable que l'atome d'hydrogène soit l'atome simple de la première création, on n'hésitera pas à admettre la modification apportée par Dumas à l'énoncé primitif. Que l'hydrogène ne soit pas l'atome primitif, on pourrait le déduire de ce qu'il a réellement tous les caractères des métaux. Berzelius avait déjà obtenu l'alliage du mercure avec l'*ammonium*. Graham vient d'obtenir l'alliage en proportions définies du palladium avec l'hydrogène, qu'il appelle *hydrogenium*.

Atome primitif.

Composition des atomes indécomposés.

Passons au second point : un coup d'œil jeté sur la table des poids atomiques nous apprend aussitôt que, pour plusieurs corps, leurs valeurs sont multiples les unes des autres, ou égales à la moyenne de deux ou plusieurs autres. Le manganèse et le chrome ont le même équivalent, celui de l'oxygène est à celui du soufre :: 1 : 2. Les métaux alcalins donnent lieu aux rapports les plus curieux, et l'amplitude des variations est telle que l'on est autorisé à regarder les relations comme vraies. L'équivalent du sodium est la moyenne de ceux du potassium et du lithium $\frac{39+7}{2}=23$. En doublant le poids proportionnel du sodium et en l'ajoutant à celui du potassium, on a le nombre correspondant au rubidium $46+39=85$, etc.

Circonspection à apporter dans ces recherches.

Celui qui voudrait se contenter de simples approximations, trouverait de nombreuses relations numériques de ce genre, mais sans profit pour la vérité. En cela, il faut agir avec la plus grande circonspection, sans quoi on tombe dans de puériles combinaisons de chiffres, et en diminuant l'unité de mesure, tous les poids deviendront des multiples l'un de l'autre. Toutefois, une parenté tellement étroite unit les corps de certains groupes, que les analogies de propriétés se poursuivent dans les corps nouvellement découverts qui viennent grossir les familles déjà établies; citons comme exemple le cas des métaux alcalins. Pour les faire rentrer dans la loi de Dulong et Petit, c'est-à-dire pour faire en sorte que les chaleurs spécifiques de leurs atomes égalent celles des autres métaux, on avait été obligé de réduire de moitié les poids propor-

tionnels qui leur étaient attribués : or le thallium, métal obtenu tout récemment, n'échappe pas à cette particularité[1].

Par contre, le chlore, le brome et l'iode présentent une exception remarquable. L'analogie la plus grande règne entre ces trois métalloïdes, et cependant leurs équivalents ne sont pas des multiples exacts les uns des autres, car il a été reconnu que le nombre proportionnel du brome n'est pas la moyenne de ceux du chlore et de l'iode comme on l'avait pensé d'abord. Devra-t-on dire, pour cela, que ces substances, dont la similitude est frappante, ne présentent aucun rapport réciproque de poids atomique, et par suite de composition? Non assurément, et la difficulté a été résolue par Dumas, en faisant une étude comparative très-rigoureuse des dérivés, formés par les radicaux organiques unis à ces métalloïdes.

Vu l'importance de cette question, il est utile de donner ici un court extrait de son travail.

Une des familles les mieux caractérisées de la chimie organique est celle des éthers ; éthers méthylique, éthylique, propylique, butylique, etc., la composition de leurs radicaux est représentée par — Constitution des atomes complexes.

$$C^2H^3 = \text{carbone } 2 + \text{hydrogène } 3 = 15 + 0$$
$$C^2H^5 = \text{—} \quad \text{—} \quad \text{—} \quad = 15 + 14 = 29$$
$$C^2H^7 = \text{—} \quad \text{—} \quad \text{—} \quad = 15 + 2 \times 14 = 43$$

Vingt-deux corps de cette famille sont connus, et tous leurs poids atomiques s'expriment par 15 plus un multiple de 14, de telle sorte que la formule générale de ce poids est :

$$a + nd$$

ou bien

$$15 + n \times 14$$

Or de cette série de valeurs, tous les termes pairs diffèrent fort peu d'être doubles les uns des autres, et cependant on tomberait dans une profonde erreur, si on se laissait guider par ce caractère ; puisque la véritable loi est tout autre, et que les nombres considérés forment une simple progression arithmétique dont la raison *d* est additive.

Un autre groupe est celui des amides dont le radical composé AzH^4 donne naissance à un grand nombre de dérivés, dans les-

[1] Dumas, *loc. cit.*

quels à 1, 2, 3, 4 équivalents d'hydrogène peuvent être substitués 1, 2, 3, 4 équivalents de méthyle, et pourvu que la somme ne surpasse pas 4, elle peut prendre la place de l'une quelconque des 4 molécules ; ce qui revient, en définitive, à ajouter au radical les valeurs de 1, 2, 3, 4 équivalents de $C^n H^n$; par conséquent la formule générale de ces composés est

$$a + n \begin{cases} d \\ d' \\ d'' \\ d''' \end{cases}$$

en désignant par d, d', d'' les poids des équivalents des divers carbures d'hydrogène appartenant à la série $C^n H^n$. Mais par la substitution, et par l'arrangement des termes, il est possible d'obtenir une foule de dérivés dissemblables ; la formule algébrique des combinaisons porte à deux cent mille au moins le nombre possible des radicaux de ce genre.

Dans ce cas, le premier corps a demeure constant, mais il y en a d'autres dans lesquels il change et devient successivement $2a$, $4a$; les différences présentées par le second composant restant toujours les mêmes. Ainsi, l'étain et l'éthyle donnent la série représentée par

$$na + n'd'$$

dans laquelle a et d' peuvent se répéter, et d' lui-même peut se changer avec un autre quelconque des équivalents d, d', d''.

Ces faits nous donnent la clef de la proportion relative du fluor, du chlore, du brome, de l'iode. Entre les poids atomiques de ces substances, savoir : 19 ; 35,5 ; 80 ; 127 existent les relations suivantes :

Fluor. . . .	$= a$	$= 19$	$= 19$
Chlore. . . .	$= a + d$	$= 19 + 16,5$	$= 35,5$
Brome. . . .	$= a + 2d + d'$	$= 19 + 33 + 28$	$= 80$
Iode	$= 2a + 2d + 2d'$	$= 19 + 33 + 56$	$= 127$

avec l'azote, le phosphore, l'arsenic, l'antimoine et le bismuth, on a :

Azote. . . .	$= a$	$= 14$	$= 14$
Phosphore. .	$= a + d$	$= 14 + 17$	$= 31$
Arsenic. . .	$= a + d + d'$	$= 14 + 17 + 44$	$= 75$
Antimoine. .	$= a + d + 2d'$	$= 14 + 17 + 88$	$= 119$
Bismuth. . .	$= a + d + 4d'$	$= 14 + 17 + 176$	$= 202$

Le carbone, bore, silicium et zirconium donnent :

Carbone. . .	$= a$	$= 6$	
Bore. . . .	$= a + d$	$= 6 + 5$	$= 11$
Silicium. . .	$= a + 3d$	$= 6 + 15$	$= 21$
Zirconium. .	$= 3a + 3d$	$= 18 + 15$	$= 33$

Il règne quelques incertitudes sur le poids équivalent du zirconium.

Pour l'oxygène, le soufre —, le sélénium et le tellure, on trouve :

Oxygène.. .	$= a$	a	$= 8$	$= 8$
Soufre. . .	$= 2a$ ou	$a + d$	$= 8 + 8$	$= 16$
Sélénium. .	$= 5a$	$a + 4d$	$= 8 + 32$	$= 40$
Tellure. . .	$= 8a$	$a + 7d$	$= 8 + 56$	$= 64$

Ici la différence est $a = d$, de sorte que la seconde formule s'applique.

Le magnésium et les autres métaux terreux forment le groupe que voici :

Magnésium.	$= a$	$= 12$	
Calcium. . .	$= a + d$	$= 12 + 8$	$= 20$
Strontium .	$= a + 4d$	$= 12 + 32$	$= 44$
Baryum. .	$= a + 7d$	$= 12 + 56$	$= 68$
Plomb. . .	$= 2a + 10d$	$= 12 + 90$	$= 104$

Finalement, les métaux alcalins donnent

Lithium. .	$= a$	$= 7$	
Sodium. .	$= a + d$	$= 7 + 16$	$= 23$
Potassium.	$= a + 2d$	$= 7 + 32$	$= 39$
Rubidium..	$= 3a + 4d$	$= 21 + 64$	$= 85$
Cœsium. .	$= 4a + 6d$	$= 28 + 96$	$= 124$
Thallium. .	$= 6a + 10d$	$= 42 + 160$	$= 202$

Il est remarquable de voir les trois derniers métaux dont la découverte est postérieure à la théorie de Dumas, concorder si exactement avec elle.

Nous pourrions multiplier ces comparaisons et montrer que les équivalents de nombreux corps simples diffèrent les uns des autres d'une quantité constante. Exemple : le titane $= 25$, l'étain 59; différence 34, c'est-à-dire le double 17, excès de l'équivalent du phosphore sur celui de l'azote. On a donc la série :

Titane	$= 25$	
		. . . 34
Étain	$= 59$	
		. . . 34
Tantale	$= 93$	

De même les suivants :

Chrome	= 26
Molybdène	= 48
Vanadium	= 70
Tungstène	= 92

forment une progression arithmétique, dont la raison = 22.

Objection. Mais, dira-t-on, ce sont là de purs jeux de combinaisons dont tout le secret réside dans le choix bien entendu d'une unité ; et, le poids équivalent des métalloïdes et des métaux variant de 1 à 176, on peut facilement trouver des rapports parmi les diviseurs du dernier nombre. Réponse. Cette objection n'est pas soutenable, car 1° on ne compare pas seulement les extrêmes de la série, mais aussi les termes intermédiaires dont les rapports sont exprimés par des nombres moins grands ; 2° l'extrême rigueur apportée par les chimistes modernes à la détermination des poids atomiques ne permet pas de taxer d'erronées les relations que l'on découvre entre ces valeurs ; 3° l'analogie des propriétés physiques et chimiques des corps, compris dans les groupes signalés ci-dessus, porte d'elle-même à soupçonner entre leurs molécules quelque rapport constant dans la structure. Cette analogie subsiste dans les radicaux organiques, comme dans ceux d'origine minérale, et le premier constituant a semblé être celui qui détermine le genre du groupe, tandis que l'autre, c'est-à-dire la différence, ne détermine que l'espèce. Qui ne voit des types homologues dans le fluor, l'iode, le brome, le chlore, substances désignées, à juste titre, sous le nom générique de corps halogènes? Qui ne serait frappé de la parfaite conformité des fonctions chimiques des métaux alcalins ou bien encore des corps acidifiants, tels que le sélénium, le soufre, l'oxygène et le tellure, et ainsi de suite? Concluons donc, avec le savant auteur dont le travail nous a servi de guide, que :

1° *Les équivalents des corps simples appartenant à une même famille naturelle, forment toujours une progression arithmétique, à la façon des radicaux de la chimie organique.*

2° *La raison de cette progression constante est quelquefois remplacée dans certains termes de la progression par une raison équivalente, circonstance qui dissimule la simplicité de la loi*[1].

[1] Dumas, *loc. cit. C. R* XLV.

Les faits une fois observés, le chimiste s'arrête, et il a raison; mais e philosophe s'empare de ces résultats et s'efforce de les interpréter et de les généraliser. Pour nous, nous en tirons cette conséquence inévitable, que les corps regardés jusqu'ici comme simples, sont réellement des agrégats très-compliqués d'autres éléments complexes, mais finalement réductibles en une seule matière.

Confirmation de cette théorie.

Cette doctrine est encore appuyée par les récents travaux de Tyndall, dont nous avons déjà parlé. D'après ce physicien, les gaz simples, même lorsqu'ils sont mêlés dans les proportions voulues pour donner lieu à certaines combinaisons, absorbent la chaleur avec infiniment moins d'intensité que ne le font les gaz composés, différence qui tient à la complication de leurs molécules. Les molécules des gaz simples étant moins anguleuses et moins complexes que celles des autres, l'éther vibrant éprouve au milieu d'elles un moindre frottement. Ce résultat s'accorde parfaitement avec la faible valeur du poids atomique, pour nous montrer les gaz simples comme formés par des assemblages atomiques extrêmement simples. Au contraire, les molécules organiques, dont le pouvoir absorbant est très-marqué, sont formées par un très-grand nombre d'atomes élémentaires. Les parfums qui sont le plus ordinairement des huiles essentielles, ont une puissance d'absorption énorme. Puisque nous voyons ces molécules très-complexes entrer en combinaison comme les plus élémentaires, il n'y a donc de ce côté aucune impossibilité à croire que les molécules élémentaires elles-mêmes ne sont pas simples.

Différence entre les deux classes.

Les deux classes de molécules diffèrent cependant entre elles. Et premièrement dans celle de la seconde, la réunion des atomes est tellement établie, qu'elle ne cède pas à nos moyens de décomposition : mais si l'on veut regarder, que ces moyens se réduisent en définitive à la mise en jeu du mouvement moléculaire calorifique ou électrique, aidé par les forces mêmes qui constituent l'affinité; on reconnaît que la différence qui sépare les molécules dites simples et celles reconnues comme composées, se réduit à ce que les unes et les autres ne résistent pas également à l'agitation thermique.

2° Il y a encore une autre circonstance intéressante dont nous

avons parlé déjà ailleurs, qui empêche de comparer en tout les éléments des corps indécomposés aux composés organiques, observation qui a été relevée par M. Berthelot. Elle consiste en ce que dans les corps organiques le composé a une chaleur spécifique, qui est la somme des chaleurs spécifiques des composants, ou exactement ou à très-peu près, pendant que cette loi ne se vérifie pas pour les éléments des corps chimiques indécomposés, regardés comme composés d'une substance seule, l'hydrogène par exemple. Cela prouve que leur connexion doit dépendre de quelque principe différent de la constitution de la matière connue aujourd'hui, de sorte que pour les séparer la puissance de la chaleur est insuffisante, et ce résultat est réservé à une action d'ordre supérieur et inconnue jusqu'ici.

Ainsi arrive-t-il que les combinaisons élémentaires peuvent passer d'un extrême de température à l'autre sans se détruire, tandis qu'il n'en est plus ainsi des molécules surcomposées d'origine organique, qui ne peuvent supporter une variation de chaleur même assez faible. Et cela, précisément à cause de leur complication, car plus le nombre des corpuscules composant un système est considérable, plus est grande l'amplitude des variations que peut éprouver une molécule dans sa forme et son état d'agrégation, plus faible devient par suite sa résistance à la décomposition, laquelle souvent aura lieu par un simple changement dans l'ordre des parties, sans qu'aucune d'entre elles ne se sépare de la masse totale.

Isomérisme. En effet, lorsqu'une grande quantité de corpuscules sont réunis, il faut tenir compte non-seulement de leur nombre, mais aussi de leur disposition ; car il arrive souvent que, sans éprouver de changement dans sa masse, le composé varie par suite de la transposition de ses parties constituantes. De même que le dessin d'un échiquier, dont les carreaux sont de deux ou plusieurs couleurs différentes, se prête à des milliers de combinaisons ; de même un nombre déterminé de corpuscules hétérogènes, en s'assemblant de diverses manières, peut donner naissance à une foule de composés doués des propriétés les plus dissemblables. La chose est bien connue des chimistes : ils savent que plus est élevé le degré de combinaison, plus abondent les corps *isomères*, spéciale-

ment parmi les combinaisons organiques. Cela se voit clairement dans les figures de M. Gaudin.

Ajoutons à cela l'impossibilité géométrique de disposer dans l'espace, à trois dimensions, des points réciproquement équidistants dans tous les sens; d'où il suit que de tels systèmes solides doivent avoir une densité plus grande, suivant telle ou telle direction. On comprend maintenant à quel degré de variété peuvent atteindre les combinaisons obtenues avec une quantité constante de matière, suivant le mode de groupement, de condensation, etc. **Inégalité de distribution dans l'espace.**

Par ces diverses considérations se trouve justifiée la théorie atomique de la constitution de la matière. On peut regarder celle-ci comme un agrégat de systèmes de plus en plus simples; la molécule d'un composé organique nous représente un système d'ordre supérieur très-compliqué, où les systèmes composés jouent le rôle d'éléments. Dans la chimie minérale la molécule dite élémentaire appartient à un ordre inférieur, mais rien ne dit que la série a sa fin aux termes que nous appelons corps simples; seulement, vu notre impuissance à séparer ses constituants et à reconnaître le dernier terme de cette série, nous appliquons à ces substances ce qui doit s'entendre des derniers groupes d'atomes proprement dits.

Dans les systèmes atomiques, il faut considérer, en outre, la vitesse de projection initiale, en vertu de laquelle la forme de leurs orbites, l'amplitude de leurs excursions et le volume de l'espace occupé peuvent être notablement différents. Il se pourrait très-bien que nous ayons là, comme le dit Graham, la clef de la diversité des poids des équivalents chimiques. En outre, des volumes égaux peuvent lorsqu'ils se réunissent, conserver en totalité ou en partie leurs mouvements de translation, changer celui de rotation, et ainsi faire varier la densité de l'élément[1], et c'est peut-être de ce principe que dépend la solution de la difficulté proposée par M. Berthelot. **Différence des forces vives.**

Voilà à quelle idée générale de la constitution des corps nous amène l'étude comparative des phénomènes chimiques, combinée à celle de la chaleur, et de toutes les manifestations générales de la matière. Dans cet ensemble théorique, les hypothèses ont le

[1] Graham, *Proceedings*, R. soc. London, XII, p. 621.

moins d'arbitraire possible, et sont, du reste, appuyées sur des preuves nombreuses.

En conclusion : les groupes atomiques de complexité décroissante, qui constituent les divers corps de la nature ont, pour derniers termes, les molécules des substances nommées *éléments chimiques* : mais rien n'empêche que ces molécules ne soient elles-mêmes d'ordre supérieur : cette limite est admise seulement parce que là s'arrêtent nos forces décomposantes actuelles, et parce que nous ne pouvons reconnaître distinctement le dernier terme de cette série, de sorte qu'il est parfaitement rationnel *de regarder la matière comme composée d'atomes distincts et originairement séparés*.

La théorie atomique, loin d'être absurde et de ne pas se prêter à l'explication des phénomènes, comme certaines personnes le prétendent, est, au contraire, celle qui découle directement des faits. De plus, elle ne dépend en rien de la théorie des forces qui assemblent les atomes car elle subsiste, soit qu'on attribue le mouvement des atomes, les uns vers les autres, à des causes occultes, à des puissances internes, soit qu'on les suppose réunis par l'action extérieure d'un milieu en mouvement. Les doter de forces abstraites est certainement chose facile, mais nous avons vu, plus d'une fois à quelle complication conduit un pareil système, et quel nombre prodigieux de forces il faut imaginer. Enfin, pour tout dire, on arrive de la sorte à attribuer aux atomes une espèce d'intelligence, qui leur permet de discerner s'ils doivent agir ou non, ou à leur donner implicitement une faculté de perception qui les avertit de la présence des éléments susceptibles d'être attaqués par eux, hypothèses évidemment absurdes. De plus, il reste toujours la grande question : en quoi consiste cette force abstraite d'affinité? Pourquoi ne s'épuise-t-elle jamais? Comment se fait-il qu'étant sans cesse active et prête à agir sur tous les corps, lorsqu'on lui en présente deux à la fois, elle s'attaque à l'un et pas à l'autre ; y a-t-il là un choix intelligent? Nous pourrions facilement multiplier nos questions, mais en vain, assurés que nous sommes qu'elles resteraient sans réponse. Il est donc préférable de montrer comment il est possible de concevoir les forces de cohésion comme dérivant du mouvement dont la matière est animée.

CHAPITRE II

DES FORCES ATTRACTIVES EN GÉNÉRAL : COMMENT ELLES PEUVENT ÊTRE PRODUITES PAR LES MOUVEMENTS MÉCANIQUES.

Base de la discussion.

Pour nous, les corps sont des agrégats d'atomes probablement homogènes à l'origine, et qui, en se groupant de diverses manières, forment les molécules dites élémentaires. Cette hypothèse est extrêmement probable ; toutefois, il n'est pas indispensable de la prendre comme base de nos conclusions futures. Outre ces agrégats, c'est-à-dire les atomes grossiers, il existe une matière plus atténuée et subtile que nous nommons *éther*. Pour nous, elle est constituée par les atomes de premier ordre ; ceux qui ne partagent pas notre manière de voir admettent que c'est une matière *sui generis*. Que l'on soit partisan de l'émission ou des ondulations, on est forcé d'admettre l'existence de ce milieu, car en acceptant l'émission, il faut reconnaître que les émanations du nombre infini des corps radiants qui traversent incessamment l'espace le remplissent d'une quantité énorme de molécules en répulsion réciproque, à cause de leur vitesse prodigieuse, ce qui constitue un véritable fluide. Ainsi, les deux théories, bien que différentes par l'énoncé, se réduisent, en somme, à une seule et même [1].

Production des attractions.

Étant donné qu'il existe un milieu autre que la matière palpable et pesante, demandons-nous s'il ne serait pas capable de produire des attractions, alors même que paraissent manquer ces changements d'équilibre qui constituent l'état électrique ; car, dans ce cas, nous pouvons répondre avec certitude par l'affirmative.

En effet, l'étude de l'électricité a prouvé que *toute rupture d'équilibre dans l'éther, qu'elle survienne par condensation ou par raréfaction, donne lieu à des attractions*. Ce résultat expérimental servant de point de départ, il n'est plus impossible que

[1] Voy. ci-dessus, liv. II.

tous les phénomènes de la nature puissent s'expliquer aisément par des différences d'équilibre éthéré dans les molécules des corps; ces différences, du reste, sont clairement indiquées, par toute l'électro-chimie. De cette façon, les actions moléculaires ne seraient qu'un effet de la disposition de l'éther autour des molécules, analogue à celui qui constitue l'état passager dit état électrique, mais qui en réalité se trouverait former l'état permanent des corps.

Après cela, il n'est plus impossible que les attractions planétaires se produisent par un mécanisme semblable, et leur cause, si longtemps cherchée, pourrait bien être la diffusion inégale de l'éther dans l'espace; car, selon toute vraisemblance, ce fluide affecte autour des masses de dimensions finies des variations de densité analogues à celles qu'il présente autour de chacune des molécules appartenant à ces masses. En un mot, tout se passerait comme dans les corps électrisés, à cette différence près que la variation de densité est accidentelle dans ceux-ci, et qu'elle est permanente et nécessaire dans tous les corps. Nous voilà conduit rationnellement à rattacher la gravitation à l'électricité, rapprochement qui n'est pas nouveau, car il a été tenté par plusieurs physiciens.

La gravité réduite à l'électricité.

Nous pourrions admettre ce fait comme assez bien établi par ce que nous avons exposé dans le livre précédent; mais il est nécessaire de développer ces idées avec soin et d'expliquer de quelle façon l'équilibre de l'éther vient à être troublé autour des molécules, et en quoi cette action diffère de la vibration. Ce point une fois établi, le reste s'en déduit nécessairement. Or, à cela rien d'impossible, attendu les propriétés de la matière, et spécialement le mouvement qui anime ses dernières particules. Il convient d'ajouter du reste que la théorie, dont nous allons esquisser les traits principaux, est présentée par nous comme hypothèse et comme telle n'est pas la seule à l'aide de laquelle on puisse concevoir ce résultat.

Réflexions préliminaires

Premièrement, voici quelques réflexions générales utiles, à présenter dès l'abord. Nous avons dit, ailleurs, combien il était impossible de concevoir ce que l'on appelle une force attractive, quand on prend ce mot dans son acception rigoureuse, c'est-à-dire

pour représenter un principe actif, siégeant à l'intérieur des molécules et agissant sans aucun intermédiaire à travers le vide absolu. Cela revient à admettre que les corps agissent à distance les uns sur les autres, c'est-à-dire là où ils ne sont pas : hypothèse absurde, aussi absurde quand il s'agit de distances énormes que lorsqu'on parle de distances fort petites.

Impossibilité de l'action à distance.

Mais, peut-être, en retournant notre objection contre nous-même, on dira que l'action ne peut non plus avoir lieu entre les corps que nous prétendons être en contact, car même ceux-ci agissent là *où ils ne sont pas*. Un corps qui par le choc tend à en mettre un autre en mouvement n'est certainement pas là où il tend à aller, et par suite agit où il n'est pas. Raisonner ainsi, c'est vouloir s'abuser par un sophisme. En effet, il est dit dans notre proposition, agir où il n'est pas, et sans *aucun intermédiaire*. Nous concevons très-bien, en effet, la possibilité d'une action à distance dans le cas d'un intermédiaire, mais il n'en est plus de même quand l'intermédiaire manque. Quand (fig. 62) un corps A en choque un autre B, au moment où les surfaces parviennent au contact, l'un chasse l'autre en vertu de l'impénétrabilité, et à la surface du contact le corps existe certainement, et par là nous avons ici un intermédiaire. Si l'on insiste en disant que cela n'est pas de nécessité absolue, nous l'accorderons volontiers; car, loin d'admettre que ces lois soient de nécessité métaphysique, nous les acceptons comme lois empiriques et entièrement libres dans leur cause première. La différence capitale qui sépare la communication du mouvement au contact de celle qui se fait à distance, c'est que, dans ce dernier cas, le mouvement est transmis par quelque chose d'interposé, et cela nous suffit. Peut-être niera-t-on le contact, mais nous l'admettons en donnant à ce mot le sens que nous avons plusieurs fois expliqué dans le cours de cet ouvrage.

A B

Fig. 62.

A la fin du second livre, nous avons signalé déjà les embarras sans nombre auxquels on arrive en envisageant les forces comme des *tendances*. Loin de diminuer, les difficultés ne font que s'accroître, car alors il faut supposer les forces agissant tantôt dans un sens, tantôt dans un autre. Ces tendances sont donc de

pures imaginations qui s'évanouissent une à une devant les progrès incessants de la science[1].

L'action à distance est sans preuve.

A toutes ces difficultés théoriques et physiques, s'ajoute une circonstance qui porte le dernier coup à la doctrine que nous réfutons, c'est le manque complet de preuves directes. En effet, les auteurs, au moins le plus grand nombre, admettent qu'étant supposé deux molécules dans un espace vide, elles ont la propriété de s'attirer et de se précipiter l'une vers l'autre, suivant certains rapports, etc.; et ils regardent cette propriété comme une propriété absolue de la matière. Or une telle assertion ne s'appuie sur aucun fait. D'abord, parce que nous ne pouvons observer l'action de *deux seules* molécules, et encore moins observer cette action dans le vide *absolu*. Tout ce que nous voyons s'accomplit entre des masses finies, composées, et de plus au sein d'un milieu : si bien que le principe fondamental de l'attraction matérielle ne repose nullement sur des données expérimentales. Cette conception a pris naissance ainsi. Voyant les corps célestes tendre les uns vers les autres; et, d'autre part, ces corps étant sensiblement sphériques, par une fiction mathématique, on a supposé toute leur masse condensée à leur centre ; on les a réduit, en un mot, à des atomes ou molécules. Mais ces mouvements ne s'accomplissent pas dans un espace absolument vide, et il reste toujours à se demander s'ils ne sont pas causés plutôt par une action impulsive extérieure, que par un principe résidant à l'intérieur des corps; aussi les anciens physiciens et Newton lui-même ont-ils laissé cette question en suspens. Les mathématiques ne peuvent ici rien décider, elles enseignent que deux corps se rapprochent avec une vitessse qui est dans un certain rapport avec les distances parcourues, c'est là une loi empirique, elle ne fait rien savoir de la cause et ne dit pas si c'est une impulsion ou une autre action. Donc le cas de *deux mo-*

[1] Un exemple rendra notre pensée plus clairement. Chacun sait que les plantes tendent vers la lumière. Cette tendance mystérieuse est-elle une propriété de la plante, dans le véritable sens du mot? La réponse est facile : le tissu végétal, exigeant pour se développer l'action chimique des rayons lumineux, la plante croît du côté de la lumière, si bien qu'aux yeux de l'observateur superficiel, la plante cherche la lumière, tandis que réellement c'est la lumière qui fait la plante. Un autre fait, bien que d'un genre tout différent, se peut comparer à celui-ci. On sait que les efflorescences salines se développent sur une surface là où elle est le mieux en rapport avec l'air libre ; faut-il dire pour cela que le sel cherche la sécheresse et l'air libre?

lécules isolées, agissant l'une sur l'autre dans le vide absolu, est une pure fiction géométrique. A ceux qui disent qu'il s'agit là d'une loi primitive, d'un acte direct de la volonté de Dieu, nous répondrons que par de tels moyens on tranche toutes les questions; mais le physicien agit autrement, il cherche si vraiment cela est un acte primitif et direct de la volonté Suprême, ou seulement un acte médiat.

Influence du milieu.

Au contraire, en réalité, dans la nature, les corps qui agissent réciproquement à distance étant toujours immergés dans un milieu quelconque, si sans se laisser fourvoyer, on suit la voie logique, on cherchera à expliquer la tendance incessante des corps, les uns vers les autres par une action du milieu ambiant. Disons plus, en raisonnant d'après les faits, on arrive à conclure que, contrairement au principe fondamental de l'attraction, deux particules matérielles isolées doivent se repousser bien plutôt que s'attirer. Ne voit-on pas, en effet, la force expansive augmenter à mesure que la matière atteint un plus grand état d'atténuation, et son intensité acquérir un maximum là où la matière est plus divisée, comme on l'observe lorsqu'elle traverse les substances poreuses ?

Quand la science n'admettait que l'existence des milieux tangibles, il était permis de croire au vide des espaces planétaires ; mais puisque aujourd'hui il est prouvé qu'un milieu peut exister et même produire des effets puissants bien qu'il ne soit pas perceptible directement par nos sens, nous avons le droit de poser comme principe démontré que l'attraction exercée par un corps sur un autre, ne s'observe jamais entre deux atomes isolés, et toujours entre les systèmes d'atomes et au sein d'un milieu. Il reste à faire voir que c'est ce milieu lui-même qui détermine ces actions.

Comment ce milieu peut-il agir?

Nous supposerons le milieu composé d'atomes isolés, indépendants, impénétrables et mobiles avec double mouvement de translation et de rotation ; ces deux dernières conditions nous dispensent d'admettre, dans les atomes, soit une loi d'élasticité intérieure, soit une force répulsive ou toute autre. Cela posé deux hypothèses sont possibles relatives à l'état des atomes : ou 1° ils sont en repos absolu et privés de mouvement rotatoire ; ou 2° ils

sont doués d'un mouvement de translation et de rotation, ou même d'un simple mouvement de rotation. Examinons d'abord ce qui se passe dans un tel milieu au moment d'un choc dû à une cause quelconque, et qui peut être une molécule ou un atome du milieu lui-même animé d'une impulsion comparativement grande.

Puisque, d'après la première hypothèse, les éléments du milieu sont en repos et ne présentent aucune élasticité, il est clair que le mouvement se communiquera d'après les lois de la transmission dans les corps *durs*. Il se fera une translation simultanée de la masse qui exerce le choc, et de celle qui le reçoit, et cette translation s'étendra jusqu'aux dernières limites du milieu, sans autre effet que le déplacement d'une portion de la masse dans une direction déterminée qui laissera en arrière un vide partiel. Que si on veut supposer les atomes doués d'élasticité, l'effet se réduira à une vibration par le moyen de laquelle la masse qui produit le choc communique sa vitesse au milieu ambiant, puis revient en même temps au repos et rien de plus. Cette hypothèse sur la constitution du milieu ne permet pas d'expliquer les attractions.

Nécessité des atomes en rotation.

Examinons la seconde hypothèse. Si les éléments du milieu sont animés de mouvement rotatoire, le choc ne donnera pas naissance à un mouvement de translation rectiligne, mais à un mouvement se répandant sur une certaine étendue autour du centre d'ébranlement. En effet le choc sera oblique à l'axe. Le cas où il serait dirigé exactement sur le pôle et dans la direction de l'avant est un cas infiniment peu probable. En conséquence, par la composition du mouvement rotatoire avec celui de translation appartenant à l'atome qui exerce le choc, une résultante oblique prendra naissance ; cet atome rebondira sur le premier, puis heurtera un autre plus ou moins voisin de celui-ci ; il sera renvoyé contre un troisième, et ainsi de suite. L'atome en mouvement agira d'abord de même qu'un corps élastique lancé au milieu d'autres également élastiques, mais de plus, suivant son incidence, il se fera des mouvements de *réflexion* qui équivaudront aux effets d'élasticité : des mouvements de *progression* par lesquels les atomes continuant à suivre leur direction première dilateront le milieu : enfin des mouvements de *conversion* positive ou négative, selon que la rotation conservera le même sens ou non. Ainsi, par

l'effet de ces chocs, le centre de l'atome pourra revenir en arrière, ou être précipité en avant, ou changer de direction, et dans chacun de ces cas sa vitesse pourra augmenter ou diminuer[1]. D'où il suit que l'atome ne perdra pas toute sa force au premier choc, il se mettra peu à peu à décrire un mouvement giratoire, et, les atomes voisins participant à l'agitation, une dilatation et un changement d'équilibre prendront naissance et s'étendront autour du centre d'ébranlement, dans tous les sens, sur une étendue plus ou moins grande. C'est là ce que nous nommons la sphère d'action.

Et comme chaque atome est à son tour capable de choquer les atomes voisins, il devient par là un véritable centre d'ébranlement : ainsi le mouvement se propage de la première à une seconde couche sphérique, puis de celle-ci le mouvement passe à une troisième, et ainsi de proche en proche. On voit aisément la différence qui sépare ce mode de propagation de mouvement de celui qui aurait lieu dans un milieu simplement élastique, car dans ce dernier les *progressions* et les *conversions* manquant, il n'y a pas, en réalité, dilatation permanente, mais seulement retour complet à l'état premier, de telle sorte que, l'onde une fois passée, tout retombe au repos et alors tout finit par une onde. Dans le cas où l'ébranlement se répète sans interruption parce que le centre d'agitation agit d'une façon permanente, un milieu simplement élastique ne fait que vibrer, tandis que si, comme nous le supposons, les atomes sont en rotation, il se produit une dilatation qui, à *une certaine distance*, peut donner naissance à une sphère agitée, à l'intérieur de laquelle la densité est décroissante du centre vers la circonférence. Le degré de raréfaction produite, dépendra du rapport de la vitesse de l'atome choquant, à la vitesse avec laquelle les atomes environnants pourront aller remplir l'espace laissé vide par l'écartement dû au choc : en

Résultat du choc des atomes en rotation.

[1] Voy. liv. I, chap. vi. Dans ces derniers temps on a imaginé de nombreux jouets d'enfant très-instructifs sous ce rapport. Une toupie en fonte est lancée à grande vitesse sur un plan légèrement incliné et garni de colonnes fixes; le choc de la toupie de l'une à l'autre de ces colonnes, et les réflexions nombreuses qu'elle subit comme si elle était un corps élastique, nous donne l'idée de ce que fait une molécule dans le cas dont nous parlons. Les mêmes phénomènes s'observent dans une boule lancée avec force sur un plan parsemé de grosses épingles fixées solidement et capable de résister au choc.

d'autres mots il dépendra de l'intensité de la pression qui règne dans le milieu, de sorte que si la vitesse de la molécule surpasse celle de la lumière, le vide pourra être absolu. (Voir ce que nous avons dit dans le livre II, chapitres VI et VII.)

Diminution de densité autour du centre de mouvement.

Évidemment un centre, alors même qu'il est unique, pourvu qu'il soit animé d'un mouvement suffisamment énergique et durable, peut déterminer l'agitation d'un milieu illimité et le modifier de façon à ce que la densité, minimum au centre, aille en croissant à mesure que l'on s'approche de la circonférence. L'intensité du choc s'affaiblit en proportion de la masse ébranlée, et la dilatation varie en raison inverse du carré des distances; en vertu de la loi bien connue que la masse des couches sphériques mises en mouvement augmente suivant cette même proportion. De tels effets pour se produire, remarquons-le bien, n'exigent pas que les atomes soient sphériques, car la théorie des rotations nous enseigne que la forme extérieure des corps qui s'entre-choquent n'exerce aucune influence sur les résultats observés, que tout dépend de la disposition de leurs axes principaux d'inertie ; et qu'enfin un corps de figure quelconque peut toujours être remplacé par un ellipsoïde régulier. Admettons donc comme démontré qu'un point animé d'un mouvement continu de translation et de rotation engendre autour de lui une atmosphère de densité décroissante vers le centre.

Rapprochement des centres d'oscillation.

Imaginons maintenant qu'à côté du premier centre d'ébranlement A, par exemple (fig. 63), il s'en développe un autre B, situé nécessairement à l'intérieur de la sphère d'action de A, puisque celle-ci, avons-nous dit, peut s'étendre jusqu'à l'infini. Évidemment la quantité de matière et par suite la résistance au mouvement que rencontre la parcelle ou l'atome B cessera d'être égale partout ; elle est plus grande vers la partie extérieure et plus faible en dedans ; si bien que le long de la ligne B A, qui unit les deux centres, la masse et la résistance est minimum, et par suite un plus grand espace est parcouru par l'ébranlement parti de B, quand il exerce un choc

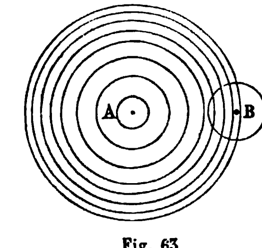


Fig. 63.

du côté de A, que quand le choc se fait sentir dans la direction opposée. D'où il résultera un transport de B vers A ; et, comme cette facilité plus grande au mouvement, dure autant que l'agitation centrale, les deux centres se rapprocheront jusqu'à ce qu'ils soient arrivés au contact, ou plutôt jusqu'à ce que l'un d'eux agisse par choc direct sur l'autre. A ce moment commence une réaction réciproque, d'abord entre les atomes A et B, puis entre ces atomes et le milieu ambiant, lequel présente dès lors un centre d'action dont l'énergie est double de celle qu'il avait auparavant, ce qui produit des effets que nous examinerons plus loin. De cette analyse il ressort que deux atomes ou deux molécules en mouvement au sein d'un milieu constitué, comme il a été dit, *ont une tendance réciproque au rapprochement*, non en vertu d'une force intérieure, mais à cause de l'inégale résistance au mouvement que présente le milieu dans les divers sens, dès l'instant où le centre agissant n'est plus unique. Dans ces conditions, il se produit ce que l'on appelle une attraction. Toutes les causes capables d'augmenter l'intensité du mouvement modifieront nécessairement les effets de cette attraction apparente.

Production d'une attraction.

Quand il existe un grand nombre de centres d'ébranlement, la résultante finale dépend de leur somme, de leur distribution, de leurs mutuelles distances et les règles ordinaires de la mécanique permettent de la déterminer. Le géomètre pourra ne pas tenir compte du mécanisme suivant lequel s'opère le rapprochement des atomes, mais accepter seulement ce mouvement comme un fait primaire se manifestant toujours suivant une même loi, et lui appliquer dès lors les méthodes de calcul usitées dans le cas de la force attractive.

Attraction universelle.

Supposons actuellement la matière pondérable composée de *centres de mouvement immergés dans un milieu*. Il en résultera forcément que *chaque centre tendant à se rapprocher des autres, une véritable force d'attraction se produit partout où ces centres existent*. Cette tendance au rapprochement est le résultat des variations qu'éprouve la densité du milieu autour des deux molécules en présence. Ainsi nous sommes conduit à donner des attractions une théorie semblable à celle que nous avons proposée pour les corps électrisés.

. On se tromperait beaucoup si l'on nous objectait que, d'après notre manière de voir, chacun des atomes de l'éther devrait se constituer centre d'attraction ; car ce fluide étant formé par des atomes égaux et isolés, tous en rotation ayant une masse et une vitesse égales partout, l'ébranlement ne peut donner naissance à une dilatation définie dans aucun sens, parce qu'il n'y aura nulle part un centre d'action prédominante. Mais le contraire arrivera là où il y a un centre de masse ou de vitesse plus grande. Tel est le cas des molécules pesantes, et celui où deux et plusieurs atomes, réunis ensemble, agissent comme une masse unique.

Constitution des centres d'ébranlement.

L'examen du cas théorique sur lequel nous nous sommes arrêté sera complet si nous disons comment on doit concevoir ces centres d'ébranlement. Sur ce point deux hypothèses sont possibles :

1° Ou ce sont des points de matière primitive dont la masse, le volume, la vitesse, sont plus grandes que dans les autres parties, et dont le mouvement est un attribut naturel au même titre que leur propre existence ; ces centres sont précisément ce que nous nommons atomes pondérables :

2° Ou bien un petit nombre d'atomes éthérés se groupent de façon à équivaloir à une masse unique, leur réunion n'étant qu'un effet de leur inertie. Supposons, en effet, que quelques atomes possèdent une égale vitesse de translation et de rotation : une fois réunis, ils continueront à se mouvoir ensemble ; et cet agrégat de particules parfaitement distinctes agira comme une masse simple. Ce sont de tels centres dont la masse est multiple de celle des autres atomes isolés qui constituent très-vraisemblablement les molécules de la matière pondérable. Celle-ci ne différerait donc pas en substance de l'éther. Dans une molécule, les atomes ne sont pas nécessairement en contact absolu, il suffit d'un synchronisme exact de leurs mouvements, qui donne à tous les atomes élémentaires une parfaite unité d'action, et une énergie proportionnelle à leur nombre.

Influence de la rotation.

La rotation des atomes en favorise beaucoup le groupement ; en effet, comme ils s'entre-choquent sans cesse, le parallélisme s'établit peu à peu entre les axes d'un certain nombre d'atomes qui bientôt s'assemblent en une seule molécule. Enfin ce système heu-

tant d'une façon rhythmique, à droite et à gauche, en avant et en arrière tous les atomes environnants, donne naissance à un véritable tourbillon; à son tour celui-ci diminue la densité de l'éther tout autour du système. Conséquemment, dans les groupes d'atomes formés, comme il vient d'être dit, les éléments ne sont liés par aucune force spéciale, ils restent accolés les uns aux autres d'abord, parce qu'ils ont une égale vitesse, et dans la même direction, ensuite parce que le milieu ambiant exerce sur eux une pression. Cette pression tient à la densité plus grande du milieu environnant, à son inertie, et aussi à la réaction des chocs qu'exercent les autres centres de mouvement qui s'y trouvent.

On nous demandera sans doute pourquoi les tourbillons ne se dissipent pas sous l'influence de la force centrifuge qui s'y développe : nous répondons d'avance que cela tient partie à la cause qui les engendre, partie à la moindre pression qui règne dans leur intérieur. Semblable chose se passe dans les tourbillons des fluides ordinaires, et spécialement des gaz : ne voit-on pas des colonnes d'air tournoyantes se transporter dans l'atmosphère à une distance de plusieurs milles sans se rompre? En outre, il faut remarquer que les mouvements giratoires des fluides pondérables ne sont pas semblables en tout à ce que nous avons nommé tourbillons éthérés. Ceux-ci naissent d'une rotation extérieure s'effectuant autour d'un axe déterminé, et au milieu d'une partie du fluide qui d'abord restant en repos relatif, enveloppe la masse animée de giration, puis participe peu à peu au mouvement, alors que celui-ci envahit un espace de plus en plus étendu, si bien qu'il finit par devenir tout à fait insensible. Les tourbillons des liquides et des gaz ne sont en définitive que des ondes d'un certain genre, mais les tourbillons éthérés ont leur origine dans la force de projection qui anime chacun des atomes en particulier et par cela il n'ont pas une direction d'axe permanent, et donnent enfin origine à une modification dans la pression du milieu. Leur conservation est parfaitement assurée, car le milieu dans lequel ils se développent n'est pas en repos, chacun des atomes environnants a une force et une impulsion à restituer; aussi ceux qui se meuvent suivant des orbites fermées et cèdent dans un sens une partie de leur vitesse aux atomes voisins, peuvent en regagner une certaine quan-

Objection.

Réponse.

tité d'un autre côté, et ainsi le mouvement se conserve indéfiniment, comme nous avons déjà dit plusieurs fois dans le cours de cet ouvrage.

Dimension des tourbillons.

Les tourbillons, ou plutôt les centres et sphères de dilatation, ont certainement une petitesse excessive ; et il en faudrait plusieurs millions pour représenter la longueur d'une onde lumineuse. L'agitation des atomes ne peut donc se révéler à nos sens ni comme chaleur ni même comme lumière, car l'amplitude de leurs mouvements est infiniment moindre que celle des vibrations lumineuses. Chacun de ces tourbillons que nous pouvons nommer infinitésimaux, constituent ou renferment une molécule des corps suspendue, en quelque sorte, dans le reste de l'éther environnant, qui, même à une distance très-grande, se trouve dilaté ; très-faiblement, à la vérité, en comparaison de celui existant au sein des groupes atomiques, mais cependant d'une manière sensible ; et c'est cette raréfaction intérieure qui, agissant dans tous les sens, donne lieu à une dilatation graduelle parfaitement comparable à celle que nous avons dit se développer autour d'un centre unique d'ébranlement, et c'est elle qui détermine l'attraction des masses limitées[1].

Quelque idée qu'on se fasse des centres de mouvement, qu'on les envisage comme des agrégats d'atomes éthérés ou comme des corpuscules de nature et de structure différentes, il n'en demeure pas moins vrai que leur très-rapide mouvement de rotation et de translation engendre autour d'eux dans le milieu ambiant un tourbillon dont l'effet est de mettre en giration une partie de l'éther, de le raréfier suivant une loi constante jusqu'à une distance infinie. Pour détruire un tourbillon, pour en accélérer la rotation ou la retarder, pour la traverser avec un corps étranger, pour en changer la direction, une force extérieure, une puissance mécanique, est toujours nécessaire. Alors il arrivera souvent que deux ou plusieurs tourbillons se réuniront en un seul, lequel, sous une sorte d'enveloppe giratoire commune renfermera un ou plusieurs tourbillons plus rapprochés, mais dont les centres ne se toucheront pas.

Forces moléculaires et de gravité.

Les forces attractives dépendent donc de trois principes parfai-

[1] M. Thomson est arrivé aussi, lui, à cette idée, que les molécules des corps ne seraient que de simples tourbillons éthérés. C'est déjà un résultat intéressant que de nous être rencontrés avec cet illustre savant.

tement distincts : 1° de l'agitation pure et simple des atomes dans tous les sens ; 2° des rotations atomiques ; 3° de la compénétration réciproque des sphères ainsi constituées l'une dans l'autre. Les forces moléculaires supposant, avons-nous dit dans le premier livre, une orientation des axes, doivent dépendre de l'action réciproque des mouvements rotatoires agissant à une forte petite distance : au contraire, la gravité résultera du simple choc des atomes en rotation et de la dilatation qui l'accompagne, quelle qu'en soit, du reste, la direction ; c'est la seule modification du milieu qui se propage à grande distance.

Or, partout où se trouvent des centres de matière et de mouvement, l'éther présente un certain degré de dilatation. C'est pourquoi la gravité agit sur tous les corps, et constitue une propriété générale de la matière, et elle serait ainsi une conséquence de ce mouvement imprimé à toute la matière. Mais il ne peut en être de même de l'action giratoire développée par les excursions des molécules centrales lorsqu'elles s'accomplissent dans certaines directions. Au voisinage de ces centres la dilatation sera très-variable, parce qu'elle subira l'influence des rotations et de l'oscillation rectiligne de la molécule, influence qui changera avec l'amplitude du mouvement, et quand les distances seront considérables, ces influences deviendront insensibles. En conséquence, la loi élémentaire de la résultante sera complétement différente dans la couche contiguë à la molécule et à une grande distance ; voilà pourquoi il ne faut pas confondre la gravité avec l'action moléculaire.

Nous trouvons là une seconde manière de concevoir le mécanisme du phénomène attractif ; et de ce nouveau principe il nous sera possible de tirer, comme autant de conséquences, l'explication des nombreuses particularités que nous présentent les corps composés ; un peu plus loin nous ferons voir comment l'agrégation des corps dépend des diverses modalités de cette cause déterminante.

Parallèles des systèmes moléculaires avec les systèmes célestes.

Tous les mouvements qui s'accomplissent dans l'éther ne sont certainement pas perceptibles ni à la vue ni aux autres sens, et, pour eux comme pour les vibrations lumineuses ce serait folie d'en demander une preuve palpable ; ces sortes de mouvements

ne se peuvent démontrer que par le raisonnement. L'analogie est ici le seul guide auquel nous pouvons nous confier, et c'est elle qui déjà a permis aux physiciens de découvrir le véritable mode de propagation de la lumière, dès qu'ils eurent remarqué les nombreux points de contacts qui unissent l'acoustique à l'optique.

Nous ne nions pas que l'esprit éprouve quelques difficultés à admettre des mouvements aussi variés, une structure aussi complexe dans une molécule que nous sommes habitués à envisager comme un petit solide géométrique en repos. Et cependant le physicien en se représentant la molécule matérielle ainsi constituée ne risque pas une hypothèse plus improbable que celle reçue communément en astronomie touchant la constitution des nébuleuses. Dans le champ d'un télescope, une nébuleuse nous paraît un disque ou un anneau immobile. Mais la raison nous avertit bien vite que c'est là une pure apparence due à la faiblesse de nos instruments et à l'immensité des distances; qu'en ce point de l'espace règne certainement une agitation excessivement grande sans quoi la forme que nous présente la nébuleuse ne saurait elle-même exister. Ce qui a lieu aux confins de l'univers se retrouve dans la molécule, cet autre extrême de la création. L'infiniment grand des mondes célestes est le domaine de l'astronome, l'infiniment petit des atomes appartient au naturaliste, mais un tel partage est tout artificiel; ici et là les lois demeurent les mêmes, la même mécanique gouverne les astres et les atomes. Le physicien qui s'illusionnerait jusqu'à prétendre déterminer les dimensions de la dernière molécule d'un corps simple serait aussi ridicule que cet ancien astronome qui avait évalué, disait-il, en milles anglais, la distance de Londres à la voûte étoilée!

Conservation des tourbillons.

La conservation du mouvement dans les systèmes tourbillonnaires n'offre aucune difficulté sérieuse après ce que nous venons de dire, et après les remarques déjà faites au sujet des vibrations calorifiques. Le mouvement ne se détruit jamais, il se transforme, change de direction, etc.; car, lorsqu'un corps tourne et se transporte à la fois, il est impossible que ses deux mouvements cessent simultanément. En effet, pour détruire la rotation, un choc doit être excentrique; par suite, il détermine le déplacement du centre

de gravité ; et, d'autre part, tout choc qui neutralise la translation change la rotation.

Dans tous les phénomènes physiques exposés jusqu'ici, et qui se passent journellement sous nos yeux, les mouvements semblent souvent s'annihiler, mais ce n'est qu'une apparence, et, en réalité, ils ne sont que transformés, soit en mouvements moléculaires appréciables, comme la chaleur, ou en d'autres travaux qui contre-balancent, surpassent même l'action de la gravité, et produisent, à l'intérieur des solides, les réactions réciproques des molécules. Les mouvements des derniers atomes de la matière se font nécessairement dans un véritable vide absolu ; et, par conséquent, les pertes de force vive sont impossibles ; de résistance, il n'y en a pas davantage ; par conséquent, ils persistent indéfiniment comme l'inertie de la matière. Les effets de frottement qu'ils paraissent éprouver se réduisent à une communication de mouvement au milieu ambiant, ce mouvement s'ajoute à celui que le milieu possède déjà, et ainsi l'énergie ne s'éteint jamais. S'il y avait une cause quelconque constamment active qui entretînt ces mouvements, la force vive des systèmes moléculaires augmenterait continuellement, ce qui est absurde. C'est donc la seule inertie qui satisfait à tout par les moyens déjà indiqués ailleurs.

Les développements qui précèdent nous font comprendre que l'attraction est une conséquence du mouvement de la matière, et la théorie ici exposée est *une des manières* d'expliquer cet effet. La première impulsion une fois donnée, le mouvement ne s'anéantit jamais et persiste dans la masse sous une forme ou sous une autre.

Quelques analystes distingués ont donné de l'attraction une théorie dynamique autre que celle adoptée par nous. Par exemple, on a fait remarquer que, lorsqu'un liquide est animé d'un mouvement ondulatoire, les corps qui s'y tiennent suspendus peuvent subir un déplacement ; ainsi les vagues de la mer rejettent sur le rivage les épaves flottantes ; et, pour citer un autre fait, ne voit-on pas, dans une masse formée par des substances de densité différente, les parties les plus lourdes gagner le milieu, lorsqu'on imprime à cette masse des secousses répétées. Enfin, d'autres géomètres, considérant que l'analyse mathématique donnait dans les

mouvements vibratoires une composante longitudinale sans action dans la lumière, lui ont attribué l'attraction. Cette idée ne nous déplaît pas, car elle nous semble, en définitive, rentrer à peu près dans la nôtre. Mais à toutes les théories qui déduisent l'attraction du mouvement ondulatoire, il est possible de faire l'objection suivante. Les ondes emploient du temps à se propager, et jusqu'ici on n'a pas constaté que les attractions se propageassent d'une manière successive.

L'attraction effet de pression. D'après notre système, tout se réduirait à de simples effets de pression : or, bien qu'au début la différence de pression ne s'établisse pas instantanément, cependant, au bout d'un certain temps, chaque centre de matière a autour de lui une sphère raréfiée qui, une fois développée, continue à exercer son action d'une manière permanente. Quand survient un déplacement du centre matériel, la sphère raréfiée se forme successivement avec une vitesse supérieure à celle du mouvement du centre lui-même. Elle ne s'établit pas tout d'un coup comme l'onde lumineuse, mais par une série de renforcements et de dilatations successives de la sphère préexistante ; c'est pourquoi il est impossible de reconnaître l'influence de ces mouvements dans les effets des attractions[1].

Maintenant que nous savons d'une manière générale par quel mécanisme une attraction prend naissance, servons-nous de ces principes pour expliquer les groupes principaux de faits où les influences attractives entrent en jeu.

CHAPITRE III

APPLICATION DU PRINCIPE PRÉCÉDENT A L'ATTRACTION MOLÉCULAIRE HOMOGÈNE ET A L'AFFINITÉ CHIMIQUE.

Trois espèces de forces. Les forces de la nature, desquelles il nous reste à parler, sont de trois espèces : 1° celles qui déterminent l'agrégation des corps

[1] L'auteur qui, en 1868, nous a objecté que Laplace avait démontré qu'il est impossible que la gravité se propage comme la lumière, n'avait pas fait attention à ce que nous disions ici ou tout au moins ne l'avait pas lu. Ce même auteur nous a attribué bien d'autres opinions qui ne sont que des imaginations de son cerveau.

homogènes ; 2° celles qui unissent les substances hétérogènes ; et 3° celles qui, s'étendant à des distances très-grandes, produisent les attractions planétaires et la gravité. Envisager ces forces comme dérivant de principes distincts a toujours semblé une superfétation inutile. C'est voir la complication là où, dans le plan de l'univers, règne une admirable simplicité. Ces diverses manifestations sont de même ordre, et les physiciens de tous les temps se sont constamment efforcés de rapporter les effets analogues, autant que faire se pouvait, à un même principe, comme nous le voyons par l'histoire de l'électricité ; de nos jours, cette tendance s'est encore affirmée davantage[1].

Le premier effet que nous devons examiner est la cohésion des masses limitées, laquelle semble ne pouvoir exister que si l'on imagine les particules matérielles attachées les unes aux autres par des liens particuliers. Avec un peu de réflexion, on se convainc aisément du contraire. En effet, même dans ces corps, les molécules pondérables ne sont pas en contact réel, mais sont distantes les unes des autres ; elles ne diffèrent des molécules d'une masse gazeuse que par le moindre écartement qui les sépare. Leur réunion ne suppose donc que les seules forces qui existent dans tous les autres états de la matière, mais à un *degré* d'intensité plus ou moins prononcé suivant qu'il s'agit de tel ou tel état physique. Tout corps solide soumis à l'action du feu se dilate, se ramollit, se liquéfie, et les parties étant ainsi séparées, la cohésion disparaît. Ainsi la cohésion est liée à un certain degré de rapprochement des parties ; car, dans le solide le plus compacte, entre une particule et la suivante se trouve toujours un intervalle sans lequel le mouvement thermique serait impossible. La question à poser est donc celle-ci : le lien qui réunit les molécules solides consiste-t-il en forces abstraites ou bien est-il le résultat de l'action d'un milieu ? Évidemment il ne s'agit pas ici de forces abstraites ; car, pour être excessivement petits, les intervalles moléculaires n'en existent pas moins, et nous serions forcés d'admettre que les

Cohésion des solides.

[1] Nous avons déjà exposé les idées de Mossotti. Il convient encore de rappeler ici quelques paroles de Lamé qui méritent d'être citées (*Théorie de l'élasticité*, p. 2) : « La gravitation et l'élasticité doivent être considérées comme effets d'une même cause, qui rendent solidaires et dépendantes toutes les parties de l'univers. »

Circonstances influentes.

forces agissent à distance, ce qui est absurde. Reste donc à examiner la seconde hypothèse.

De même qu'il n'est point nécessaire d'admettre dans ces corps une répulsion réelle, mais qu'il suffit d'un mouvement expansif, pour expliquer certains phénomènes, ainsi les phénomènes attribués à l'attraction sont dus à cette disposition du milieu que nous avons signalée dans le chapitre précédent. Nous avons reconnu deux faits bien distincts qui constituent l'attraction : 1° la simple dilatation et la différence de densité du milieu provenant du double mouvement d'impulsion et de rotation des atomes ; 2° l'enveloppe commune et la rotation de la totalité du tourbillon enveloppant. La première force paraît être inséparable de la molécule pondérable, elle est la conséquence nécessaire du mouvement dont elle est douée ; son intensité extérieure dépend de la distance ; c'est elle qui donne naissance à la force qui règle les mouvements des astres, et constitue la gravitation universelle. La seconde peut exister ou non et être plus ou moins active à une certaine distance : elle est la cause des attractions moléculaires. Déjà dans le premier livre nous avons vu que, dans les deux classes de phénomènes, le principe initial n'était certainement pas identique en tout ; nous allons actuellement éclaircir ce sujet.

Structure des solides.

Les solides ordinaires, avons-nous dit ailleurs, sont tels en vertu d'une cristallisation plus ou moins parfaite, et leurs propriétés optiques nous montrent un groupement régulier autour de *certaines directions axiales* dans les dernières parties qui les constituent. La molécule intégrante du cristal n'est autre chose qu'une réunion de ces centres d'action convenablement orientés. Mais comme les sphères ne peuvent remplir un espace donné étant en même temps distribuées uniformément dans toutes les directions, ces juxtapositions d'atomes donnent, en général, naissance à des solides ayant des axes principaux de dimensions inégales. Les molécules fondamentales doivent donc avoir des moments d'inertie inégaux dans les diverses directions, et leurs rotations respectives ne sont pas les mêmes. D'où la diversité des formes cristallines primitives ; desquelles, par les procédés de la cristallographie, se déduisent toutes les autres formes composées. Étant admis que chacun des centres élémentaires de ces figures agisse

suivant une loi déterminée, par exemple, qu'elle exerce une action quelconque inversement proportionnelle à une puissance des distances, la structure de l'édifice moléculaire se déduira de cette loi par des raisons de pure géométrie. De plus, la résultante des actions complexes qui se passent dans les solides élémentaires déterminera des attractions spéciales en rapport avec leur forme spéciale. Encore que les orientations primitives soient explicables sans recourir à l'intervention d'un milieu; toutefois, elles deviennent par là plus faciles à comprendre.

En étudiant les changements d'état, nous avons vu que par la diminution graduelle de la vitesse propre aux molécules d'une substance gazeuse (ce qui revient à dire par la soustraction incessante du mouvement calorifique), ses molécules se rapprochent à tel point qu'une pénètre dans la sphère d'activité de l'autre, de façon à n'en pouvoir sortir. Alors elles se précipitent l'une contre l'autre avec un mouvement accéléré, et un choc violent a lieu, qui se traduit par un dégagement de chaleur; si bien que, pendant le passage d'une partie du gaz à l'état liquide, la masse totale s'échauffe et ainsi empêche la liquéfaction de l'autre partie. Les sphères d'activité dont nous avons parlé alors, suivant le langage reçu des physiciens, ne sont autres que les tourbillons avec les sphères de raréfaction dont ils occupent le centre; et admettre que les sphères d'activité de deux molécules se fondent en une seule, équivaut à dire que deux tourbillons se réunissent sous une enveloppe commune. Au moment de ce rapprochement, les deux molécules se précipitent l'une contre l'autre, un choc a naturellement lieu par lequel la vitesse de translation se trouve transformée en une oscillation de la masse qui se manifeste comme chaleur, laquelle conserve une partie de la même masse à l'état élastique. Si la force vive continue à être absorbée, de nouvelles quantités de gaz passeront successivement à l'état liquide jusqu'à ce que la masse entière soit liquéfiée. Passage des gaz à l'état liquide.

A cet état, les mouvements de translation indéfinis sont éteints, les molécules restent emprisonnées dans la sphère des circonvoisines et oscillent suivant des courbes fermées, dont l'amplitude est fixée par la pression extérieure et par la force impulsive interne. Mais les axes sont libres dans tous les sens, et les rotations n'ont pas Solidification des liquides.

de direction commune définie. Que la soustraction de chaleur soit encore poussée plus loin, les molécules déjà formées continuent à se rapprocher, elles ressentent bientôt l'influence des rotations qui tendent à les mettre dans des directions parallèles et à les orienter. Alors, sans que le mouvement oscillatoire ait complétement cessé, le groupe formé conservera une forme déterminée et invariable. Au moment où ce second changement d'état s'effectue, une portion de l'éther change de vitesse et de direction, une certaine quantité de force vive se manifeste extérieurement, qui est celle dont étaient animés les axes des tourbillons durant le mouvement rotatoire, car ils cessent d'être axes instantanés ou tout au moins axes de mouvements analogues aux précessions pour devenir des axes permanents. Il est clair que, dans ce cas, la force vive, mise en liberté, est beaucoup moindre que dans celui examiné précédemment ; de même pour le dégagement de chaleur. Déjà cette conclusion a été signalée dans le livre I[er], nous la reproduisons ici pour montrer que l'hypothèse d'un milieu éthéré, loin de porter atteinte aux conclusions posées précédemment, les affirme, au contraire.

Les limites de distance en deçà et au delà desquelles une molécule est enfermée dans la sphère d'une autre, dépendent de l'intensité de la force impulsive et de la pression de l'éther ambiant. Ces deux éléments doivent être parfaitement définis dans chaque cas. A cause de cela, les points du passage d'un état à l'autre correspondent toujours à des températures fixes, la pression artificielle que supporte les substances demeurant constante ; ils varient, au contraire, avec celle-ci.

Cristallisation et agrégation confuse.

Les groupes cristallins une fois formés par la simple orientation des axes et une enveloppe commune doivent, en vertu des actions élémentaires de leurs atomes, réagir réciproquement entre eux à des distances excessivement petites, mais avec une énergie qui, d'après leur forme, n'est pas la même dans les diverses directions, et de la sorte ils peuvent tenir unis ensemble les éléments des groupes voisins qui ne sont pas parfaitement orientés, comme il arrive dans les agrégations confuses. Cela est facile à entendre, parce que, étant admis le principe d'une action élémentaire, il s'ensuit comme conséquence

géométrique une forme spéciale du petit solide formé, et cette forme elle-même fait que certaines actions sont plus énergiques dans un sens que dans un autre. Ainsi s'expliquent les tendances des cristaux à se déposer sur les angles, les propriétés spéciales des corps filamenteux, etc., etc.

Production de chaleur et d'électricité dans les changements d'état.

Lors d'un changement d'état physique, une portion de l'éther placé entre les molécules est souvent expulsé, ou au moins prend une autre disposition, parce que son mouvement dans l'intérieur du corps est nécessairement changé. De là les dégagements de chaleur et d'électricité qui les accompagnent, de là les courants électriques que fournissent les métaux au moment de la solidification, et cette augmentation ou cette diminution de conductibilité que présentent les métaux, selon qu'ils se contractent ou se dilatent en prenant l'état solide[1].

De tout cela résulte que dans les liquides, et bien plus encore dans les solides, les molécules sont enfermées au sein d'une espèce d'atmosphère commune, plus dense que le milieu occupant leur intérieur; autrement dit, en réalité, à l'intérieur des corps l'éther est raréfié[2]. Aux raisons qui ont été précédemment données, nous pouvons ajouter que la grande conductibilité des métaux (classe de corps dont les poids atomiques sont très-élevés), peut tenir à ce que, à l'intérieur de ces substances, l'éther est proportionnellement moins condensé que dans les autres, et que par suite, lorsqu'ils sont envahis par le torrent électrique, ce dernier y trouve une circulation plus facile.

Puissance diffusive de la matière.

Depuis longtemps déjà, Fusinieri et Graham ont noté que, plus par des moyens mécaniques ou autres, on porte la matière à un grand état de division, plus on augmente son pouvoir diffusif; si bien qu'à travers les parois poreuses, la pénétration réciproque des gaz acquiert une intensité extraordinaire. A cette même force diffusive se réduisent les phénomènes d'expansion que présentent les lames liquides très-minces. De tels faits prouvent qu'on ne

[1] De la Rive a constaté qu'au moment de la solidification, la conductibilité se trouvait doublée dans tous les métaux, excepté dans ceux qui, à ce moment, éprouvent une dilatation, tels sont le bismuth et l'antimoine. Il est aussi remarquable que plusieurs métaux cristallins présentent entre la solidification et la fusion un état pâteux (ex. l'étain), qui dure à la vérité fort peu de temps.

[2] Voy. livre II, p. 227 et suiv.

peut absolument pas négliger l'influence de la masse, même dans les actions moléculaires. A mesure que les molécules pesantes sont davantage soustraites à l'influence des molécules voisines qui les enveloppent, s'accroît leur facilité à céder au mouvement diffusif. Notre théorie rend aisément compte de ce résultat. Plus est grande la masse pesante intérieure, plus est grande la dilatation relative du milieu renfermé en elle, et par suite la pression extérieure; précisément, parce que la dilatation augmente quand les centres d'expansion sont très-rapprochés. Sans doute, les rayons de ces sphères, même dans la partie où elles agissent avec l'intensité maximum, sont d'une petitesse extrême, mais elles ne sont nullement négligeables les unes par rapport aux autres; aussi, quand elles sont réunies, leur action résultante est d'autant plus considérable qu'elles sont plus nombreuses. Mais à cause de cette petitesse, l'influence des masses dans les phénomènes moléculaires devient promptement insaisissable, et à de grandes distances l'effet qui constitue la gravité demeure seul sensible. En définitive, les attractions sont produites indirectement par la force expansive, celle-ci développant un état de pression ambiante, qui est la cause du mouvement des corps les uns vers les autres; cette expansion étant provoquée par la grande vitesse des molécules, qui serait plus grande que la limite d'élasticité avec laquelle le milieu peut remplir le vide formé.

Nature des tourbillons.

La nature des tourbillons éthérés est ici mise en pleine lumière, et on reconnaît en quoi notre comparaison était insuffisante, lorsque nous les assimilions à de petits moulinets; puisqu'ils sont en outre de véritables centres de raréfaction. Il importe aussi de distinguer les tourbillons moléculaires de ceux propres aux aimants. L'action de ces derniers s'étend beaucoup plus loin, au moins pour ce qui regarde la polarité magnétique permanente, car ils sont souvent détruits ou insensibles quand les autres conservent toute leur énergie. Cependant on ne doit pas repousser toute relation entre les deux genres de tourbillons; en effet, si la polarité magnétique disparaît quand une substance perd l'état solide, les dernières molécules des corps conservent toujours une certaine facilité à s'orienter, qui les rend aptes à subir l'influence de l'aimant. Le magnétisme favorise manifestement l'adhésion molé-

culaire, et peut-être il serait possible d'expliquer par là pourquoi une lime déjà usée attaque le fer alors qu'elle ne mord plus sur le laiton. Il y a tout lieu de croire que le magnétisme augmente la cohésion, car les diapasons, après avoir été aimantés, vibrent comme si on les avait raccourcis. On sait, en outre, quelles différences les divers corps présentent, relativement à la cohésion; le plus tenace de tous est précisément le fer, dans lequel l'orientation des tourbillons est tellement prononcée qu'elle donne à ce métal une structure sensiblement *fibreuse*.

Aux différents degrés d'intensité de ces forces est due toute la classe de propriétés que, dans les corps, on nomme flexibilité, viscosité, ductilité et élasticité.

L'élasticité commune résulte de ce que les groupes des molécules peuvent se déplacer d'une certaine quantité sans sortir de leurs sphères réciproques; et la cause perturbatrice ayant cessé d'agir, elles reviennent plus ou moins exactement à leur position première sous l'influence des forces qui les y sollicitent[1]. Cette élasticité est donc un effet secondaire de forces primitives et ne doit pas être confondue avec celle dite élasticité des atomes, qui est due uniquement aux propriétés mécaniques des mouvements rotatoires élémentaires. Pour ne pas avoir fait cette distinction, quelques personnes ont, bien à tort, déclaré qu'il y avait absurdité à regarder l'élasticité comme résultant des rotations moléculaires. Si l'on entend donner une telle origine à l'élasticité qui entre en jeu dans la flexion des ressorts et le choc des billes d'ivoire, la critique peut être fondée. Ce n'est pas, en effet, la rotation visible des particules palpables constituant les corps élastiques, qui directement détermine le redressement d'une lame flexible ou le rebondissement des billes d'ivoire; leur action n'est que médiate; car c'est la rotation atomique qui donne naissance aux atmosphères des molécules, et l'effet d'élasticité est toujours le résultat d'une modification survenue dans ces atmosphères. Élasticité.

Nous ajouterons que les molécules des gaz, bien qu'elles ne soient pas de vrais atomes élémentaires, tirent probablement leur

[1] Voy. la définition de l'élasticité donnée dans le IIe livre.

élasticité du même principe. Ici nous parlerons spécialement des solides.

Limites d'élasticité.

L'élasticité de certains corps a une limite qui ne peut être dépassée sans qu'il en résulte une rupture du corps. Les substances vitreuses, cristallisées ou non, etc., sont dans ce cas. Avec d'autres substances, au contraire, la limite d'élasticité une fois dépassée, les molécules ne reprennent plus leur position première, et conservent plus ou moins le nouvel arrangement qui leur a été communiqué; parmi ces substances on compte la plupart des métaux dans lesquels cette propriété constitue la *plasticité* et la *ductilité*. Ces différences sont manifestement liées au mouvement de l'éther à l'intérieur des corps.

Les substances de la première classe sont isolantes, celles de la seconde conductrices[1]. Cette division présente sans doute des exceptions; mais celles-ci, pour la classe des isolants, appartiennent à des combinaisons assez compliquées d'origine organique, et pour la seconde à quelques minéraux d'aspect métallique, certains cristaux, par exemple, à l'intérieur desquels l'éther n'a pas partout une égale densité, comme nous le prouvent leurs propriétés optiques. Toutefois, la règle indiquée s'applique à la majorité des substances, et spécialement aux corps de composition plus simple.

Rôle de l'éther dans les propriétés moléculaires.

Cette relation n'est pas difficile à comprendre d'après notre manière d'envisager l'influence de l'éther sur la cohésion. Dans les corps de la première espèce, son mouvement est gêné; aussi, quand la position relative d'une molécule est changée, quand elle est presque entraînée hors de la sphère de la molécule voisine, l'éther ne peut affluer pour combler le vide formé, rétablir l'équilibre de pression et empêcher la séparation des parties. Dans les corps conducteurs, au contraire, un tel mouvement se fait aussitôt. Un nouveau-régime d'atmosphères intérieures s'établit et remplace celui qui vient d'être détruit, de sorte que les molécules peuvent garder plus ou moins les nouvelles positions que leur ont données les forces extérieures. Les choses se passent ici à peu près comme dans une masse de matière pulvérulente. Par une forte

[1] Les substances isolantes (le verre par exemple), en laissant passer la décharge électrique, se désagrégent et leurs molécules sont lancées hors des limites de l'élasticité.

pression, elle s'agglomère, forme un solide compacte, mais qui se sépare et se désagrége facilement; si la masse est mêlée à un liquide parfaitement fluide, de façon à former une pâte, la masse prend une consistance qui en rend la séparation difficile, et lui permet de changer de forme sans se rompre; et cela parce que le liquide, en vertu de sa mobilité passant d'une partie à l'autre par effet capillaire, établit une liaison entre les parties aussitôt après qu'elles ont éprouvé le moindre déplacement.

En rapprochant les points de contraste entre les corps métalliques et les non métalliques signalés dans les diverses parties de cet ouvrage[1], on trouvera que la mobilité de l'éther, à l'intérieur des premiers, explique de la manière la plus naturelle une multitude de leurs propriétés, dont autrement il serait difficile de trouver la raison. Mobilité de l'éther dans les métaux.

Cette hypothèse a encore un avantage qui mérite d'être pris en sérieuse considération; elle jette un lien entre les propriétés optiques et électriques des corps et leurs propriétés moléculaires; ainsi la ductilité, la malléabilité des métaux, la facilité avec laquelle quelques-uns d'entre eux, l'or, par exemple, se laissent étendre en feuilles excessivement minces, dépendent de la mobilité de l'éther dans leur masse, et voilà pourquoi ceux doués de la plus parfaite plasticité et ductilité sont en même temps les meilleurs conducteurs de l'électricité, tels sont les métaux nobles.

Toutes ces propriétés appartiennent aux groupes atomiques de second ordre, les atomes primaires n'en sont pas doués. Ils ne sont ni ductiles, ni flexibles, ni élastiques; ils obéissent uniquement aux lois des corps durs, tant pour le moment de translation que pour celui de rotation; mais lorsqu'ils sont agrégés en vertu de la force de projection qui les anime, et de la pression extérieure qui s'exerce sur les groupes, toutes les propriétés générales des corps apparaissent en même temps. Atomes primitifs.

Comme le physicien praticien se propose seulement d'*ordonner* les faits et de les ramener à un principe commun (ce que l'on appelle ordinairement les *expliquer*), il se borne à considérer comme primitives ces forces qui réellement sont secondaires. Par exemple, Propriétés de la gravité et de l'élasticité.

[1] Voy. p. 247.

envisageant l'élasticité comme une force primitive susceptible de ramener les molécules à leur position aussitôt qu'elles en sont écartées, il applique son principe aux divers cas particuliers et aux diverses manières, dont l'équilibre d'un groupe moléculaire peut être troublé, suivant que la rupture d'équilibre est linéaire, superficielle ou cubique, suivant que la cause perturbatrice agit par traction, torsion, compression ou autrement. Il se déclare satisfait quand il a fait voir que tout dépend de ce fait primitif que les molécules sont ramenées à leur position naturelle d'après certaines lois qu'il s'efforce de trouver. De même le but que s'est proposé l'astronome est la réduction des phénomènes célestes à la mécanique générale par la formule de la gravitation. Mais cela ne suffit pas pour nous convaincre du caractère primordial de ces forces, elles peuvent n'être que secondaires et se plier parfaitement à toutes les exigences de l'observation. Ce sont les recherches du philosophe qui doivent éclairer la question d'origine.

En méditant sur la théorie du mécanisme des attractions donnée ci-dessus, on reconnaît avec quelle justesse Lamé a pu comparer la force d'élasticité à celle de la gravitation[1], et combien il est rationnel de rapporter ces deux forces à une même cause.

Toutes les fois que survient une rupture de l'équilibre des pressions moléculaires dans une certaine direction, aussitôt il s'exerce une attraction dans cette même direction. Tel est précisément le cas des surfaces libres, sur lesquelles s'observent les effets de *capillarité* et de *diffusion;* car, suivant la remarque très-exacte de Fusinieri, les premiers phénomènes ne sont qu'un cas particulier des seconds. Les minces couches liquides, qui se répandent avec une extrême facilité sur les surfaces fluides, s'étalent également bien sur les solides, quand elles sont dans certaines conditions dites d'affinité : ici la forme que prend la surface du liquide en mouillant un solide, et en se répandant à sa surface, joue un grand rôle dans le mécanisme de l'ascension de ce liquide à l'intérieur des tubes capillaires. La condition de capillarité doit dé-

Actions capillaires.

[1] Voy. Lamé, passage cité au commencement de ce chapitre, p. 547.

pendre de la structure relative des atmosphères moléculaires, qui, mises en contact, se fondent plus ou moins facilement en une seule. Cette force agit encore dans d'autres cas dans la dissolution, par exemple, en déterminant une diffusion. Lorsqu'on opère sur une substance d'une désagrégation facile, par exemple, sur le sel, le liquide le dissout, et il se sature jusqu'à ce que la force diffusive égale en intensité la force d'orientation qui retenait unies ensemble les molécules du cristal.

Les phénomènes capillaires nous amènent, par une transition des plus naturelles, de l'action purement moléculaire à l'affinité chimique.

Affinité chimique.

Ces deux forces ne sont pas réellement d'origine différente ; et la diversité dans leur manière d'agir est la conséquence de celle qui existe entre les masses mises en contact. Dans les attractions homogènes, les masses centrales et les atmosphères environnantes étant toutes identiques, il faut que toutes ensemble elles perdent une certaine quantité de force vive, pour qu'elles se pénètrent réciproquement et qu'il se forme une seule atmosphère enveloppant plusieurs centres. En outre, l'observation prouve qu'au moment où les atmosphères sont arrivées au degré de rapprochement voulu pour leur réunion, elles ne se pénètrent pas immédiatement et restent souvent en suspension, parce qu'il n'y a pas de cause qui détermine la réunion à se faire plutôt entre celles-ci qu'entre celles-là ; semblable chose arrive toujours quand le rapprochement a lieu peu à peu et tranquillement. Ainsi de l'eau tenue en suspension dans une huile, se conserve fluide à plusieurs degrés au-dessous de zéro, jusqu'à ce qu'une agitation extérieure vienne rompre l'équilibre instable.

L'action chimique, au contraire, s'exerçant entre masses hétérogènes, l'inégalité des atmosphères doit favoriser considérablement leur rupture et leur pénétration réciproque. En effet, puisque deux corps, animés de vitesse inégale quand ils s'entrechoquent, tendent toujours à prendre une vitesse commune, rien n'est plus facile que la réunion en un seul groupe des molécules hétérogènes et de leurs atmosphères.

Affinité relative.

L'inégalité des atmosphères étant admise, toutes les modalités de l'affinité chimique se trouvent expliquées du même coup. On

comprend pourquoi les affinités sont relatives, comment deux corps occupant la même extrémité de l'échelle des affinités, le sodium et le potassium, par exemple, ne réagissent nullement l'un sur l'autre, et, au contraire, se combinent énergiquement avec ceux placés à l'autre bout de l'échelle. Ampère attribuait le dégagement de chaleur, qui accompagne une combinaison, à la recombinaison des deux électricités, et disait que l'affinité chimique est proportionnelle aux doses relatives des fluides positif et négatif. Les faits s'interprètent beaucoup mieux dans l'hypothèse d'un éther simple, en supposant : 1° que chaque molécule est constituée à son centre d'une sphère dont le volume et la vitesse changent d'une molécule à l'autre ; 2° que la facilité avec laquelle la fusion des atmosphères, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle une molécule se précipite sur une autre, est d'autant plus grande que les atmosphères sont plus différentes, et par leur étendue et par leur vitesse.

Influence de la chaleur sur l'affinité.

Cette théorie rend parfaitement compte de l'influence de la chaleur sur les combinaisons chimiques et sur l'affinité. En effet, toute nouvelle quantité de force vive ajoutée à une masse pesante durant l'élévation de température, fait varier les vitesses de translation et de rotation des molécules d'une manière très-inégale, à cause de leur masse différente ; il peut donc se faire que deux molécules, dont les atmosphères et les tourbillons sont à une certaine température notablement différents par leur étendue et par leur densité, arrivent à avoir ces deux éléments presque égaux à une autre température, et ainsi l'affinité, ou, en d'autres termes, la facilité de pénétration des molécules, diminue. Par contre, deux molécules dont les atmosphères sont sensiblement égales, lorsque la température change peuvent devenir dissemblables, alors l'affinité, nulle à la température ordinaire, acquiert une intensité très-marquée quand le thermomètre atteint un degré plus élevé, si bien que tel corps peut, comme l'on dit, passer d'un état d'affinité positif à un état négatif, l'ordre des affinités étant complétement renversé.

Peut-être pourrait-on expliquer par là comment le même corps qui, à une température donnée, décompose un corps et en sépare un des éléments, est à son tour chassé de ses combinaisons par ce

même élément quand la température s'élève davantage, et quelquefois au même degré de chaleur. Ainsi le fer chauffé au rouge décompose l'eau et met l'hydrogène en liberté; de son côté, l'hydrogène, à la chaleur rouge ou à peu près, réduit l'oxyde de fer à l'état métallique.

Il est prouvé que dans ces actions un même corps agit tout différemment comme agent réducteur suivant qu'il est libre ou combiné, car la cohésion entre alors en jeu. C'est aussi la cohésion qui, lors du mélange de deux sels neutres, détermine leur double décomposition en précipitant un nouveau composé d'une solubilité autre que celle des deux composants. Influence de la cohésion sur l'affinité.

Cette théorie permet encore d'expliquer pourquoi dans une combinaison la chaleur dégagée est d'autant plus considérable que les termes sont plus distants sur l'échelle des affinités, et pourquoi, relativement aux actions thermiques électriques et chimiques, la sériation des corps reste la même. Il suffit de remarquer que la force vive rendue libre et la quantité d'éther dont l'équilibre est troublé sont d'autant plus grandes que les atmosphères diffèrent davantage les unes des autres. De cet éther déplacé dérivent les courants électriques engendrés dans les combinaisons chimiques. Mais, à parler rigoureusement, il n'est pas possible dans tous les cas de mesurer l'affinité chimique par le courant produit, attendu que le plus souvent il est constitué seulement par une partie de l'éther mis en mouvement, et on ne devra recourir à ce procédé de mesure que dans les cas où l'on a la certitude que toute autre déperdition d'éther n'existe pas[1]. Origine du courant chimique.

Les combinaisons chimiques se trouvent donc de la sorte réduites à des actions mécaniques, conclusion à laquelle nous sommes déjà arrivé en terminant l'étude des décompositions produites par la chaleur et la lumière. Il convient cependant d'ajouter quelques mots touchant l'influence des actions mécaniques sur les phénomènes chimiques. Pour traiter cette question, nous puiserons des données utiles dans les faits observés récemment par Clifton, en examinant les effets de la pression sur la solubilité des sels, et les autres actions chimiques.

[1] Voy. liv. III, ch. v.

Action des forces mécaniques sur l'affinité.

On savait depuis longtemps que sous de fortes pressions les actions chimiques éprouvent des changements notables. Par exemple, quand la pression dépasse certaines limites, le zinc cesse de se dissoudre dans l'acide sulfurique, l'acide carbonique, de se dégager, etc. Les nouvelles recherches poursuivies dans cette voie fournissent de solides arguments à la théorie qui regarde toute réaction chimique comme un travail mécanique. Examinons d'abord la question d'une manière générale. On peut dire que la pression, en rapprochant les molécules, agit à la façon d'un abaissement de température, et comme telle doit modifier l'affinité, par une action toute mécanique. Quand les effets de pression et de chaleur interviennent simultanément, par exemple dans les cas de fusion, de solidification des corps comprimés, la température du *point de passage* s'élève quand les substances se contractent et s'abaisse quand elles se dilatent. Dans le premier cas la pression agit dans le sens d'une soustraction de chaleur pour rapprocher les molécules, et par suite, la solidification s'obtient à une température plus basse. Dans le second cas, précisément parce que la pression rapproche les molécules, il faut pousser plus loin la soustraction de calorique afin de surmonter à la fois la pression et les autres forces; aussi l'eau suffisamment comprimée ne se gèle que si elle est refroidie à plusieurs degrés au-dessous de zéro.

Influence des pressions.

Le même effet se reproduit dans les combinaisons chimiques, et, selon que le volume du composé est plus grand ou plus petit que la somme des volumes de ses composants, la réaction est ralentie ou accélérée par la pression. Voici du reste la conclusion du savant auteur que nous prenons pour guide : « Très-probablement les recherches ultérieures démontreront que la pression affaiblit ou renforce l'affinité chimique, selon qu'elle agit contre ou en faveur du changement de volume, comme si l'action chimique était directement convertie en puissance mécanique, et la force mécanique en action chimique suivant des équivalents définis, et suivant des lois générales, sans même que nécessairement la relation s'établisse par l'intermédiaire de la chaleur ou de l'électricité. »

La connexion, ou, comme l'on dit, la *corrélation* de l'action

chimique avec la chaleur et l'électricité est manifeste dans les phénomènes de la pile, précédemment analysés par nous, et le mot bien connu de Faraday, que le *courant est une action chimique en mouvement*, ne saurait avoir de sens si l'on n'envisageait pas l'action chimique elle-même comme un effet de mouvement mécanique. Bien que l'évidence de cette proposition fût manifeste, cependant il était bon de déterminer directement l'influence des forces mécaniques sur les actions moléculaires et chimiques. Clifton a mesuré dans un grand nombre de cas les forces mécaniques que sont capables de développer certaines de ces actions. Ainsi l'eau, au moment où elle se congèle, peut soulever 106 fois son propre poids à une hauteur de 1 mètre ; le chlorure de sodium et le sel ammoniac, en se dissolvant, exercent un travail qui, pour le premier, est égal à 157 fois son poids élevé à 1 mètre de haut, et pour l'autre 171 fois. Un minéral appelé witherite, en se formant, développe un effort capable d'élever à 1 mètre un poids égal à 35 fois le sien[1].

Action chimique de la pile voltaïque.

Tout porte à croire qu'en comparant avec soin les dilatations, les capacités calorifiques et les tensions des substances à l'état de vapeur, on arrivera à rendre compte de tous ces phénomènes. Mais ici nous devons nous borner à montrer comment les principes établis suffisent pour faire comprendre le mécanisme des faits fondamentaux de la science.

Liberté des molécules dans la combinaison.

Déjà ailleurs nous avons fait remarquer que l'action chimique suppose toujours les molécules à l'état d'atténuation, de dissociation, comme l'on dit. Nous avons ajouté que les rayons lumineux émis par les corps sont de toutes les longueurs possibles, tant que ces substances sont maintenues par les liens moléculaires, de sorte que ces rayons sont comparables à ce que l'on nomme, en acoustique, des *bruits*. Au contraire, lorsque les substances sont à l'état de vapeur, elles donnent naissance à des ondes d'une longueur bien définie semblables à celles des *sons musicaux ;* cela ne montre t-il pas que les molécules vibrent en parfaite liberté sous l'influence de forces proportionnées à leur masse. La nécessité d'un état de grande division et d'une liberté aussi complète que

[1] Clifton, *Proceedings Roy. Soc.* London, avril 1863, p. 549.

possible dans les molécules qui prennent part à une réaction est facile à comprendre ; car une sphère de molécules peut ainsi agir sur une autre, la pénétrer, et se réunir à elle pour en former une seule qui est la sphère du composé. Les personnes qui, avec quelques dynamistes, ne veulent admettre que le mouvement sans l'éther, ne parviendront jamais à expliquer ces réunions moléculaires, à moins d'imaginer des forces abstraites auxquelles il faudra toujours supposer une nature des plus capricieuses.

La force chimique n'agit pas à distance.

La conséquence nécessaire des principes établis est que la force chimique ne s'exerce jamais à des distances sensibles, et que, pour se manifester, ce que nous nommons le contact est toujours nécessaire. On n'a jusqu'ici découvert aucun fait d'action chimique réalisable autrement qu'au contact, et si une grande masse favorise les combinaisons, c'est indirectement, parce qu'elle rend les points de contact plus nombreux.

Action calorifique définie dans les combinaisons.

Les mêmes principes expliquent l'égalité des équivalents calorifiques, chimiques et électriques. Comme nous l'avons déjà vu, la quantité de chaleur produite par les actions chimiques est définie pour chaque combinaison, et reste toujours la même, que celle-ci se fasse rapidement ou lentement. Nous avons en outre reconnu que cette quantité demeure constante pour l'électricité toutes les fois que le mouvement éthéré produit par la combinaison peut être recueilli dans un fil conducteur, puis mesuré ; si bien que le développement de l'électricité est subordonné à celui de l'action chimique.

On comprend très-bien la raison d'une telle concordance, puisque la force vive de l'éther représente alors la force mise en mouvement par la combinaison : à peu près comme la quantité d'air injectée par un ventilateur sert de mesure à la puissance de cet appareil. Mais le plus souvent, cette mesure n'est pas complète et elle ne peut l'être, car il faut défalquer la force vive employée aux dilatations sous forme d'élévation de température dans certaines parties du circuit, pertes difficiles à évaluer. On doit, en outre, tenir compte de ce que les produits de la combinaison chimique ordinaire et de l'action de la pile ne sont pas doués d'une égale force de cohésion ; enfin il y a une déperdition d'électricité par tous les corps très-difficile à éviter.

Clifton ayant montré que l'action chimique se résout en puissance mécanique dans les divers solides, donne très-probablement la raison des différences que l'on observe dans plusieurs cas sous le rapport de l'équivalent calorifique entre l'action chimique ordinaire et l'action voltaïque ; il suffit, en effet, d'une légère différence dans l'agrégation moléculaire des substances qui prennent naissance dans les deux cas, pour que leur formation absorbe une quantité variable de force et la rende latente, comme le dit Clifton[1]. Aussi, même dans les expériences conduites avec un soin extrême, lorsque la force vive est mesurée sous forme d'électricité, le résultat est inférieur à celui que l'on obtient en mesurant cette même force vive sous forme d'agitation thermique.

En résumé, la quantité plus ou moins grande de la force vive propre à chaque molécule qui devient libre durant les diverses combinaisons, est la source des effets mécaniques produits par les actions chimiques. Cette force vive se manifeste le plus souvent comme dilatation de la matière pondérable dans les opérations ordinaires ; mais dans les combinaisons voltaïques, elle se transmet par le moyen d'un mouvement éthéré, développé lui-même par la dilatation et la rupture de l'équilibre de l'éther.

Circonstances influentes dans les combinaisons.

La diversité du volume et de la densité des atmosphères, l'étendue variable de leurs rotations, ne sont pas les seules causes déterminantes des combinaisons ; l'oscillation rhythmique des molécules primitives y contribue puissamment. Les oscillations sont-elles en dissonance complète, leur union sera plus difficile *cæteris paribus ;* se trouvent-elles, au contraire, à l'unisson, ou présentent-elles seulement un rapport de durée tel que la coïncidence s'établisse entre elles à intervalles égaux, elles pourront très-bien osciller comme un seul corps et agir comme une masse unique, à cause de la différence entre les masses des molécules. Les périodes de vibration sont modifiées quand augmente la force vive calorifique ; par suite, la tendance de deux molécules à s'unir ne reste pas la même aux divers degrés de l'échelle thermométrique, cela tient à ce que deux substances dont les oscillations

[1] Il convient de se rappeler ici ce qui a été dit de la puissance mécanique de la chaleur eu égard à la cohésion des corps, liv. I, ch. XIII.

sont synchrones à une certaine température seront probablement discordantes à une autre.

Relations des lignes spectrales avec les affinités.

On voit quel vaste horizon la théorie mécanique de la chaleur, combinée avec celle de l'éther, ouvre aux spéculations de ceux qui cherchent une explication rationnelle des faits de la chimie, tous si bizarres en apparence. Probablement les études spectrales fourniront un jour la preuve directe de ces inductions théoriques en signalant des relations entre la longueur des ondes élémentaires lumineuses produites par la combustion d'une substance et son rang dans l'échelle des affinités. M. Hinrichs a déjà avancé de remarquables inductions sous ce rapport. Il trouve que les lignes spectrales sont plus serrées pour le corps ayant le plus grand poids atomique, et que la distance de ces lignes est approximativement inversement proportionnelle à la dimension de l'atome calculée d'après des principes fort ingénieux[1]. L'expansion de ces raies bien constatée à de hautes températures manifeste une source de modifications dans ces atmosphères qui doit réagir dans les opérations chimiques.

Donc diversité de volume dans les atmosphères, coïncidence de rhythme dans les vibrations, telles sont les deux causes principales qui provoquent la réunion des corps hétérogènes ; autrement dit, les deux causes de l'affinité chimique. De plus, le caractère essentiel de ces actions, le principe qui les gouverne toutes, c'est la permanence de la masse, de même que celle de l'énergie ou force vive. L'intensité de l'affinité doit diminuer, on le sait, toutes autres conditions égales d'ailleurs, à mesure que le nombre des molécules constituant une molécule composée devient plus grand. Cela s'explique maintenant, car ces molécules complexes sont comparables à des tourbillons qui, formés de plusieurs autres, se séparent facilement en augmentant l'énergie de ceux qui les composent et dans lesquels la pression ainsi que la vitesse de rotation diminuent quand le diamètre augmente. Voilà pourquoi les substances dont la molécule est très-compliquée, en particulier celles d'origine organique, se décomposent rapidement sous l'influence de la chaleur. Ainsi une des conditions premières de

Décroissance des affinités dans les molécules complexes.

[1] Silliman, *American Journal*. July 1866.

la vie est l'élaboration incessante de produits très-complexes, laquelle réclame une certaine température. Les êtres organisés ne peuvent supporter les variations calorifiques que dans des limites assez rapprochées hors desquelles ils cessent d'exister.

Aussi la vie végétale se distribue-t-elle en zones climatériques caractérisées chacune par une certaine moyenne du thermomètre, et si les divisions de la géographie animale sont moins nettement tranchées, c'est parce que l'animal a dans son organisme une source de chalêur qui rend en grande partie sa température indépendante de celle du milieu ambiant. Chacun sait, en effet, que la température d'un animal demeure presque rigoureusement constante. Les variations sont rendues très-difficiles grâce à mille précautions toutes providentielles ; le corps est revêtu d'enveloppes isolantes qui s'opposent à la déperdition de la chaleur, et, d'autre part, lorsqu'un exercice musculaire énergique développe de la chaleur en excès, la sueur qui se répand aussitôt à la surface des membres, détermine en se formant et en s'évaporant une réfrigération considérable. **Influence de la température.**

Telle est la théorie à l'aide de laquelle on peut coordonner les faits principaux de la chimie. Nous ne nous arrêtons pas à examiner en particulier toutes les combinaisons ; un tel travail nous entraînerait dans des longueurs sans nombre, et, vu l'état actuel de la science, il nous faudrait à chaque instant entasser hypothèse sur hypothèse ; limitons-nous à écarter certaines difficultés que les faits les plus ordinaires pourraient fournir contre la thèse développée ci-dessus.

On connaît des corps qui, mis en présence, même sous de fortes pressions, ne se combinent pas, et quand on leur imprime un choc, ou quand on les excite soit par une vibration lumineuse, soit par une étincelle électrique, immédiatement une réaction se déclare et marche avec une rapidité prodigieuse. **De quelques cas particuliers d'action chimique.**

C'est qu'en effet, pour surmonter l'inertie propre à chacune des atmosphères animées de rotation, c'est-à-dire pour changer la direction de leur mouvement individuel, il faut un effort énergique, une pression énorme ; mais une pression générale qui s'exerce sur la masse, même très-forte, par cela seul que, répartie sur la masse entière, elle agit sur toutes les atmosphères à la fois, n'arrive à

vaincre la résistance d'aucune. Par contre, une étincelle électrique ou toute autre des causes indiquées, agissant avec une grande violence sur un point très-restreint du corps, y détermine une rupture qui facilite la combinaison, puis l'ébranlement de proche en proche gagne toute la masse. Ainsi nous voyons un édifice qui d'abord résistait à des pressions considérables, s'écrouler tout à coup lorsqu'on vient à enlever une seule pierre ; de même encore un vase de verre supporte sans se briser de fortes pressions, tandis qu'un léger coup frappé sur un seul point le fait voler en éclats.

Changements brusques de température.

Au moment où s'accomplissent ces brusques changements d'équilibre, surtout ceux qui succèdent à un état de tension, il se dégage presque toujours une énorme quantité de chaleur ; et l'on ne doit pas s'en étonner, car un nouveau groupement moléculaire ne peut avoir lieu sans une extrême agitation intérieure ; d'où une vibration des atomes qui constitue l'élévation de température. Il importe toutefois de bien se rappeler que lorsque la chaleur donne naissance aux effets les plus violents, la quantité de travail mise en jeu est aussi grande que si la réaction s'était faite lentement ; la différence porte sur le temps du travail et non sur sa quantité absolue.

Actions mécaniques et explosions.

Les actions mécaniques extérieures peuvent encore décomposer les systèmes dans lesquels, à cause du grand diamètre des tourbillons, la vitesse de rotation se trouve notablement diminuée, à tel point que la différence entre cette vitesse et celle du milieu environnant étant assez petite, le moindre effort suffit pour pénétrer l'enveloppe. Un choc, une vibration, une étincelle, détruiront facilement de semblables composés, car une fois le tourbillon rompu, les molécules élémentaires reprennent leur état normal, souvent même avec une grande rapidité. De cette manière s'expliquent un grand nombre d'explosions, en particulier celles des fulminates d'argent et de mercure, combinaisons extrêmement instables et dont les molécules sont, pour ainsi dire, dans un état forcé.

Il serait absurde d'attribuer le violent ébranlement dont s'accompagnent ces décompositions à la très-faible action mécanique qui en est seulement la cause occasionnelle ; il résulte de la mise

en activité de la puissance emmagasinée dans les molécules elles-mêmes, véritables dépôts de force vive, et quand cette force vive vient à se manifester, ses effets sont bien autrement intenses que ceux qu'il nous est donné de produire par les procédés mécaniques ordinaires [1].

Que l'on se reporte à ce que nous avons dit de la puissance mécanique équivalente à l'action calorifique nécessaire pour dissocier l'eau, et l'on comprendra qu'il n'est pas absurde de supposer emmagasinée dans l'intérieur des corps une immense quantité de force vive, laquelle se convertit en chaleur au moment où ils font explosion. Dans le premier livre, nous avons déjà expliqué quel sens on doit attacher à cette manière de parler ; nous reconnaissons maintenant la nécessité d'admettre qu'autour des atomes appartenant aux divers corps les atmosphères doivent avoir une densité différente suivant qu'ils sont isolés ou combinés. La raréfaction des atmosphères exige que l'intensité vibratoire de la molécule et sa force vive augmentent d'une façon très-sensible. Mais quelle est l'intensité de ces forces employées à l'accroissement de vitesse ? Ces actions sont énormes et les faits dont nous allons parler vont nous l'apprendre. La force d'une masse d'eau qui gèle dans une seconde de temps est capable, avons-nous dit, d'élever à une hauteur de 1 mètre 106 fois son propre poids, ou bien encore d'élever son propre poids à 106 mètres de hauteur en une seconde. Par suite, elle exerce un travail sensiblement égal à onze fois celui de toute la masse terrestre à sa surface. Dans 1 kilogramme de charbon qui passe à l'état de vapeur, le travail intérieur serait de 3,910,400 kilogrammètres. (Dupré.) Un kilogramme d'eau en développe 14,415,000. Évaluation du travail moléculaire.

L'action réciproque des atmosphères peut encore donner la raison de l'effet produit par la présence d'un troisième corps, lequel souvent sert de trait d'union à la combinaison de deux autres, sans que lui-même reste combiné, action comparable à celle du métal négatif dans la pile. Peut-être alors deux atmosphères qui ne s'uniraient pas directement parce que leurs vibrations sont Actions indirectes et intermédiaires.

[1] De même la force vive dont est animé un corps dans sa chute ne lui a pas été communiquée par le faible effort nécessaire pour couper la corde à laquelle il était attaché, mais par la gravité qui précipite le corps vers la terre.

trop discordantes, peuvent arriver à la combinaison grâce à l'intermédiaire d'une autre, et il n'y a aucune absurdité à comparer le rôle des molécules de ces corps à celui des organes de transmission dans nos machines.

Analogie des actions chimique et moléculaire.

Enfin cette théorie fait comprendre comment la ligne de démarcation admise entre l'affinité chimique et l'attraction moléculaire homogène est infiniment peu tranchée, et comment la distance que l'on croyait autrefois exister entre ces deux forces va chaque jour diminuant. On voit que l'attraction homogène favorise souvent les combinaisons chimiques, non en vertu d'une action prédisposante, comme on l'avait pensé d'abord, mais parce que, au moment où, par la combinaison, un corps passe à l'état solide, il se supprime du milieu de la masse et ainsi l'action de la portion restante n'est plus empêchée. En outre, certains mouvements prennent naissance, qui facilitent le mélange des parties, dégagent la chaleur nécessaire pour accélérer et favoriser la combinaison dans les autres points. Une véritable action prédisposante est absurde, car elle serait un effet de l'attraction homogène, précédant l'existence du composé lui-même ; en un mot, ce serait l'effet préexistant à la cause.

Malgré toute la fécondité de la théorie ici exposée, nous ne nous illusionnerons pas jusqu'à penser que le moment est venu de pouvoir évaluer en nombres, poids et mesures toutes les réactions chimiques, à l'aide de considérations dynamiques. Pour arriver à un tel résultat il reste encore un chemin difficile à parcourir, et il ne faut pas se faire cette agréable illusion de croire que tout soit clair et simple. Cependant dans ce cas comme dans les autres pareils une théorie est utile, parce qu'elle fait voir les choses de haut et d'une façon générale, et peut indiquer une voie nouvelle. On commence déjà à étudier les faits chimiques sous ce point de vue, et tout fait espérer que dans un avenir prochain la mécanique moléculaire sera aussi complétement connue que l'est aujourd'hui la mécanique céleste. Mais nous ne devons pas dissimuler que les difficultés dont il reste à triompher sont considérables, et il ne sera pas donné à la génération présente de contempler ce beau triomphe de l'intelligence humaine.

Chercher les relations mécaniques et les coefficients de conver-

sion d'une force en une autre, voilà tout ce que nous pouvons faire. Ce travail difficile est déjà commencé, espérons qu'il sera poursuivi et perfectionné.

Rapport des forces aux volumes.

Nous avons signalé ci-dessus comment les nombres exprimant les intensités relatives de certaines propriétés moléculaires sont proportionnels plutôt aux volumes des corps qu'à leurs masses. Or M. Dupré a étendu au calorique dégagé dans les combinaisons chimiques les considérations que Cantoni avait fait valoir quand il considérait les variations des solides en les rapportant aux volumes et non aux masses, et il est arrivé à formuler la loi suivante : « Lorsque deux corps se combinent et forment 1 litre de composé pris à l'état gazeux, le travail chimique ou, ce qui est la même chose, le calorique produit est un multiple d'un nombre fondamental constant Q supérieur de très-peu à une calorie. » La valeur moyenne de Q est 1,029 pour dix corps de nature différente soumis à l'examen. Donc, à envisager les volumes, les actions chimiques dégageraient des quantités de chaleur multiples l'une de l'autre, suivant des nombres très-simples. Ainsi l'acide chlorhydrique donne 1, l'eau et l'acide carbonique 3, l'acide sulfureux 4, etc. [1].

Ce qui reste à faire en chimie.

Lavoisier, par l'introduction de l'usage de la balance en chimie, fonda cette science sous le rapport des masses. Mais elle est encore tout entière à faire sous le rapport des vitesses desquelles dépend la force vive ; c'est-à-dire sous le rapport de la mesure des énergies, ou pour envisager la question au point de vue purement expérimental, il reste à déterminer les équivalents calorifiques. Le jour où dans chacun des cas particuliers nous saurons estimer ces valeurs avec exactitude, ce jour-là la constitution des corps sera connue et la mécanique moléculaire sera constituée. Alors on s'étonnera qu'on ait pu professer, comme cela s'est fait jusque aujourd'hui, que les faits chimiques sont capricieux et bizarres, etc. Parler ainsi, c'est en réalité confesser notre complète ignorance.

[1] *Annales de chim. et de phys.*, vol. I, vi[e] sér

CHAPITRE IV

GRAVITATION UNIVERSELLE.

Limites de notre hypothèse.

L'analyse des forces de la nature que nous avons essayé de développer dans cet ouvrage, ne serait pas complète si nous ne consacrions quelques pages à la gravité. Est-ce à dire que nous ayons la prétention de révéler le mystère de la gravitation? Non certes, nous voulons seulement présenter à ce sujet une hypothèse conforme aux idées exposées dans les chapitres précédents.

Diverses manifestations de la gravité.

Les manifestations de la gravité se séparent en deux classes principales. A l'une appartiennent les phénomènes de la chute des corps vers la terre; à l'autre les mouvements orbitaires des astres autour de leurs centres respectifs. Il fallut le génie d'un Newton pour reconnaître et démontrer que deux ordres de phénomènes aussi éloignés dérivaient d'une même cause. Jusque-là on avait bien la notion confuse d'une certaine force qui gouvernait le cours des astres, mais personne n'en avait formulé les lois d'une manière précise, et l'on n'avait jamais prouvé qu'elle fût identique à la force qui précipite les corps graves vers la terre.

Devanciers de Newton.

Tycho-Brahé.

Lorsque les observations de Tycho-Brahé sur les comètes eurent prouvé que les sphères solides n'existaient pas, on chercha quelle cause retenait les planètes dans leurs orbites. Copernic, occupé tout entier à simplifier et à rectifier les lois géométriques du système planétaire, ne traita la question théorique que secondairement. Il remarqua seulement que la matière tendait à prendre une figure sphérique et que, par suite, les corps tendaient au centre de la terre non comme au centre du monde, mais comme au centre d'une sphère.

Copernic.

Galilée.

Galilée, en découvrant les lois de la chute des graves, reconnut que tous les corps étaient également attirés, ou plutôt également sollicités par la terre, et de ce moment disparurent de la philosophie naturelle une foule d'erreurs, telles que la distinction des lourds et des légers, la tendance vers les diverses sphères, etc.

Kepler.

Kepler, cette puissante intelligence passionnée de l'ardeur des

découvertes, voulait à tout prix surprendre le secret des mouvements célestes ; il regarda le soleil à la fois comme centre de mouvement et de force, et n'hésita pas à affirmer que de cet astre émanait la puissance qui retenait les planètes dans leurs orbites, de même que de ce foyer central rayonnaient chaleur et lumière. Les idées très-obscures, alors régnantes sur la nature de la lumière, l'empêchèrent de se former une idée nette de la manière dont s'accomplit cette action. Aussi quand il voulut identifier la cause des mouvements célestes avec celle de la lumière, la considération des ombres fut pour lui une difficulté insurmontable, et ce fut le magnétisme qu'il adopta comme principe initial. Pour lui, le soleil était un gigantesque aimant qui retenait les planètes dans leurs orbites.

Non qu'il attribuât cet effet à la force attractive magnétique[1] ordinaire du fer, mais il supposa que le soleil exerçait une action directrice provenant de ce que ses rayons étaient entraînés dans un mouvement circulaire par la rotation du soleil lui-même, rotation qu'il devina longtemps avant qu'elle fût constatée par l'observation directe. Et il arriva à dire d'une façon encore plus explicite que l'on doit se figurer les planètes plongées dans le tourbillon éthéré qui, enveloppant le soleil, est le principe de son action magnétique.

A la même époque, Gilbert soutenait que la lune tourne autour de la terre, que si elle soulève les eaux de nos océans, c'est par une influence magnétique ; en un mot, l'aimant symbolisait toutes les forces attractives, si bien que ces idées venaient appuyer celles de Kepler. Cet homme remarquable doit donc être regardé comme le véritable auteur de la théorie des attractions, et il doit être considéré comme le fondateur de ce grand principe, que la force existe dans le milieu, et non dans les centres proprement dits. Gilbert.

Ces systèmes cependant, s'ils étaient acceptables physiquement, partaient tous géométriquement d'un principe faux, savoir que la translation d'une planète suppose la circulation effective de quelque matière autour d'un centre. On n'avait pas encore pensé à expliquer un mouvement curviligne par la combinaison d'une impul- Défauts de ces théories.

[1] Kepler, *De stella Martis*, liv. III, cap. XXXIV, p. 176, lig. 22, et chap. LVII, p. 185.

sion instantanée avec une force continue centrale. Le premier exemple d'une telle composition de mouvement fut trouvé par Galilée pour le cas des projectiles; on en trouve un autre dans Borelli pour le cas du mouvement circulaire, mais la clarté de la démonstration laisse à désirer. Cet auteur fait voir comment la force centrifuge qui prend naissance dans tout mouvement circulaire peut arriver à contre-balancer la force centrale agissant sur le corps, laquelle peut être le magnétisme ou la gravité, puis il s'efforce de donner du fait une vérification expérimentale[1]. Il arrive même à cette conclusion fort remarquable que, pour comprendre les mouvements planétaires, il n'est point nécessaire d'admettre ni les intelligences des scolastiques, ni une influence magnétique, ni un éther de densité variable au sein duquel les astres sont suspendus, que tout s'explique par une simple tendance de ces corps vers le soleil, *tendance semblable à celle de tous les corps vers le centre de la terre*. Cette tendance dirigerait les planètes vers le soleil, et les satellites vers la planète autour de laquelle ils tournent, en se combinant avec une impulsion initiale, comme cela se passe dans une fronde. Malheureusement, à propos de cette seconde force, Borelli revient aux tourbillons éthérés, car ses idées très-confuses touchant l'inertie ne lui permettaient pas de comprendre qu'un mouvement se peut conserver sans être entretenu.

Borelli.

Époque newtonienne.

L'ouvrage de Borelli parut au moment où Newton commençait sa carrière scientifique, et alors les études de mécanique avaient atteint un très-haut degré de développement. En France, Huyghens s'occupait spécialement des forces centrifuges, Halley vulgarisait le système de Kepler; Hooke était parvenu à réaliser expérimentalement le mouvement elliptique (autour d'un centre et non d'un foyer, autant qu'on peut le croire). Enfin Bulliauld avait fait remarquer que la force planétaire devait être en raison inverse du carré des distances, rectifiant ainsi l'inconcevable erreur de Kepler qui avait donné comme rapport la raison inverse simple.

Newton.

A toutes les époques de grande activité scientifique il apparaît un puissant génie qui, mettant à profit les matériaux grossiers et

[1] Borelli. *Theoria Medicaorum planetarum*. Florence, 1866, p. 47.

incomplets épars çà et là, les réunit, leur donne la forme et les assemble en un tout homogène; la moindre trouée faite à grand'peine par ses prédécesseurs devient une large brèche qui lui ouvre une voie nouvelle et lui laisse voir les vérités les plus inattendues. Il en fut ainsi pour Newton. Il eut le bonheur d'arriver à un moment où se trouvaient préparés tous les éléments du problème à la solution duquel il appliqua sa vaste intelligence, et en six mois il put concevoir et élaborer l'immortel ouvrage des *Principia*. Telle est l'histoire de la marche de l'intelligence humaine vers la solution de ce grand problème.

Avant Newton, on croyait que le principe de la gravité résidait dans le centre des planètes.

Al punto
A cui si traggon d'ogni parte i pesi[1].

Principes mathé-matiques du problème.

Il prouva qu'au contraire la force de gravitation se retrouve dans chaque molécule et qu'une action réciproque s'exerce entre toutes les parties de la matière terrestre et planétaire. Par des considérations tirées de la forme des orbites cométaires et de la troisième loi de Kepler, il démontra que les planètes ne sont pas tenues dans leurs orbites par des tourbillons, comme le supposait Descartes, et que, pour expliquer les mouvements célestes, il suffit de deux forces, savoir : l'inertie qui avec l'impulsion initiale constitue l'élément tangentiel, et une force continue centrale qui n'est autre que la gravité. Cette force est inséparable de la matière, et décroît, comme toutes les actions émanant d'un centre, en raison du carré de la distance.

La nature de la gravité reste inconnue.

Mais la force planétaire une fois identifiée à la gravité terrestre et la loi de son action démontrée, elle n'en fut pas mieux connue quant à sa nature. On savait seulement qu'elle se fait sentir jusqu'aux limites les plus reculées de la création. Bien plus, Newton se borna à énoncer sur ce point quelques idées générales, sans assigner d'origine positive à cette force. Il accepta comme fait que l'accélération d'un corps vers un autre (c'est-à-dire la vitesse qu'il prendrait dans la première unité de temps si l'intensité restait

[1] Le point où tend tout ce qui pèse. (Dante, *Enfer*, c. XXIV.)

constante pendant toute cette durée), est inversement proportionnelle au carré des distances. Cette vitesse fut nommée force accélératrice, non pour indiquer quelque principe spécial inhérent aux corps, mais seulement parce qu'elle est l'effet et la mesure de la cause du mouvement, quelle que soit du reste cette cause[1]. L'espace correspondant à cette vitesse sur la surface terrestre est celui que parcourent les graves en tombant pendant la première seconde de temps : dans les orbites planétaires, c'est la quantité dont ils s'écartent de la tangente. La géométrie ne nous dit rien de plus, le reste est affaire de spéculation philosophique ; et Newton (cela a déjà été signalé ci-dessus) n'a jamais nié que cet espace pût être parcouru par l'impulsion d'un milieu.

La connaissance de la cause n'est pas nécessaire en astronomie.

L'ignorance de la cause n'empêcha point de découvrir les lois géométriques des mouvements célestes, et l'accélération étant acceptée comme fait, on put rendre compte de toute la mécanique des astres avec une exactitude que ne démentirent pas les observations astronomiques les plus parfaites ; on put encore expliquer le flux et le reflux de la mer, la figure de la terre, l'attraction par les montagnes, etc. Et il fut prouvé que tous ces phénomènes, considérés par Gilbert et Kepler comme des effets du magnétisme, résultaient de la tendance des graves au centre de la terre, ainsi que Borelli l'avait indiqué.

La question dévolue aux physiciens.

Dès lors, puisqu'il n'y avait aucune nécessité absolue de connaître la cause de la gravitation, et que c'était là une question hérissée de difficultés, jusqu'à ces derniers temps les physiciens se gardèrent de toute spéculation de ce genre, et même ils auraient pensé nuire à leur réputation scientifique, en essayant d'expliquer l'origine de la force planétaire. Ce problème a cessé d'occuper les astronomes, on l'a regardé comme se rattachant à l'étude de la matière, et ainsi il est échu aux physiciens. Ceux-ci, depuis quelques années, ont commencé à ne plus montrer autant d'éloignement pour ce genre de recherches, et nous avons pu le constater maintes fois dans le cours de cet ouvrage. Ils sont beaucoup moins réservés à ce propos, et sans formuler encore une solution définitive, ils ne doutent plus qu'il soit possible, en

[1] « Par le mot *force* j'entends une pression qui produit un effet sur le mouvement des corps qui sont libres. » Airy, *Six lectures on astronomy at Ipswich*, etc., p. 112.

faisant intervenir l'action mécanique d'un milieu, de réduire toutes les forces de la nature, sans excepter la gravité, à un seul principe.

Encouragés par la tendance des idées modernes, nous n'hésiterons pas à pousser notre induction jusqu'à ce dernier terme. Pour cela il n'est pas besoin d'introduire de nouvelles hypothèses, de fonder de nouvelles théories, il suffit d'appliquer les principes généraux, exposés dans le deuxième chapitre du présent livre, et relatifs au mode de développement d'une attraction. Nous avons vu que chaque molécule pondérable est un centre de mouvement, et par suite le centre d'une sphère éthérée de densité croissante en allant du centre à la circonférence. A cause de cette différence de densité, quand deux sphères se pénètrent réciproquement, deux points quelconques, appartenant chacun à l'une d'elles, ne peuvent plus se déplacer dans tous les sens avec une égale facilité; cette facilité est plus grande sur la ligne qui les unit; cela se résout en un rapprochement de deux points, autrement dit en une attraction apparente. Donc une attraction ne suppose pas nécessairement une véritable force impulsive extérieure, mais elle peut très-bien se produire en vertu de cette loi générale du mouvement, que si un corps en choque deux autres de masse inégale, le transport qu'il éprouve se fait surtout du côté de la moindre masse. Or, dans le cas actuel, la couche de moindre densité agit de même qu'un corps de moindre masse.

Essai actuel.

Attraction des centres élémentaires

Ce qui est applicable à chacun des centres en particulier doit s'entendre également d'un groupe de centres. Un corps fini quelconque, une planète quelconque, étant un agrégat de ces mêmes centres en nombre déterminé, autour de tels systèmes se forme nécessairement une sphère à l'intérieur de laquelle la densité de l'éther sera d'autant moindre que le nombre des centres sera plus grand. Donc la force résultante croîtra proportionnellement à ce que nous nommons la *masse*, et décroîtra pour chaque centre toujours suivant sa loi élémentaire; mais dans le groupe formé elle pourra varier avec la forme des volumes et la distribution des parties. Supposons un corps quelconque, et ce peut être une planète, dont les particules sont animées de mouvements semblables, plongé dans la sphère qui enveloppe un autre corps, la résultante

Attraction des masses composées.

des mouvements intérieurs entraîne le premier vers le second suivant la droite qui va de l'un à l'autre, comme on l'a dit pour deux centres élémentaires, parce que le long de cette ligne se trouve la moindre résistance au déplacement des deux corps. Ainsi la gravité est réduite en quelque sorte à un effet de pression statique, mais ce jeu de pression reconnaît lui-même pour cause le mouvement.

Différence de la gravité et du magnétisme.

La gravité diffère du magnétisme en ce que ce dernier phénomène est dynamique dans le sens rigoureux du mot, car outre la différence de pression il y a, en outre de la direction, des rotations dans le milieu. L'action de l'aimant dépend aussi du corps influencé ou attiré : ce qui ne se vérifie pas pour la gravité. Ainsi l'attraction d'un aimant sur un fer doux s'affaiblit si on lui en présente un autre, parce que la force vive étant partiellement distraite par le travail qu'elle doit faire sur la nouvelle masse, ne suffit plus à produire le même travail sur la première. Pour la gravité, il n'en est pas ainsi, et l'attraction exercée par un corps sur un autre ne diminue pas quand on en approche un troisième ; car, d'après la manière dont elle est produite, chacun des corps agit par lui-même et ne développe aucun travail dans celui qui est près de lui ; il détermine seulement un état particulier du milieu circonvoisin, et cet état est toujours le même, qu'il soit ou non en présence d'autres corps. Seulement, si les corps sont disposés de telle manière que leurs actions soient concordantes, l'attraction est accrue, et diminue au contraire quand elles se contrarient.

Influence de la gravité et des phénomènes électro-statiques.

La gravité présente, au premier aperçu, de nombreuses analogies avec les phénomènes électro-statiques qui, eux aussi, se réduisent à des effets de pression. Mais les deux forces se séparent nettement par leur manière d'être. L'électricité n'est qu'un état accidentel dû à l'accumulation de l'éther et à sa condensation ou à sa dilatation ; on peut jusqu'à un certain point la comparer à un mouvement qui, excité dans une masse fluide en repos, s'affaiblit à mesure qu'il s'étend et devient bientôt insensible. Pour la gravité, cet état de raréfaction dépendant de l'énergie propre aux molécules primitives de la matière et qui les anime toutes également, ne peut devenir moindre. Une autre différence essentielle

consiste en ce que, dans la gravité, nous ne connaissons aucun fait d'induction comme dans l'électricité, de sorte que, même ici, l'action du corps agissant est modifiée par la nature du corps influencé. Cela tient à ce que l'état électrique, par sa grande puissance, trouble la constitution même des atmosphères moléculaires, tandis que cette influence est insensible dans la gravité, qui est un effort incomparablement plus faible. A certains égards la gravité pourrait être attribuée à un état électrique, dans ce sens qu'au sein de tous les corps pondérables l'éther est plus raréfié, à peu près comme cela a lieu dans les corps électro-négatifs, si bien que, poursuivant cette idée, nous arriverions à dire que la terre ou un astre quelconque est par rapport à l'espace dans un état électrique négatif. Cette opinion a été déjà avancée avant nous, mais nous n'accepterons cette manière de parler qu'en lui donnant son acception la plus large, parce que l'état électrique est à nos yeux la rupture d'équilibre moléculaire qui est produite par un travail accidentel dans l'éther, et accompagne toute modification momentanée, et non celle qui est inséparable de l'existence de la matière. Donc, en général, on ne doit pas confondre la gravité avec l'électricité.

Différence de la lumière et de la chaleur.

De même, il ne faut pas identifier la gravité avec la lumière ni avec la chaleur; car, bien que ces effets résultent l'un et l'autre d'une agitation moléculaire, cependant la modification du milieu n'est pas semblable dans les deux cas. En effet, la lumière et le calorique rayonnant sont dus à la vibration transversale, laquelle, comme nous avons vu, dérive surtout de la rotation des atomes éthérés et de leur rebondissement, qui est un effet semblable au changement de forme par lequel on explique l'élasticité ordinaire. Dans les deux cas, l'effet est de transporter la force vive des composantes perpendiculaires à la ligne de propagation de couche en couche, lesquelles restent en repos aussitôt le mouvement passé. Au contraire, la gravité aurait son origine dans la composante selon le rayon, et elle serait due aux mouvements atomiques de progression; elle s'exerce d'une manière continue en vertu de la force de projection qui anime les molécules ou les atomes et les tient séparés. Les impulsions successives ne s'entre-détruisent pas, mais s'ajoutent les unes aux autres jusqu'à ce

qu'elles soient contre-balancées par la réaction réciproque des divers centres soit voisins, soit éloignés. Cette dilatation élémentaire, qui se développe autour de chaque centre, ne saurait cesser sans que le centre de mouvement s'anéantisse lui-même, et alors le milieu reprendrait *avec le temps* un nouvel état d'équilibre, de même qu'après la décharge d'un corps électrisé une nouvelle distribution s'établit dans le milieu.

Objection.

Mais si telle est l'origine de la gravité, il s'ensuivrait que toute modification du milieu qui changerait la force vive atomique devrait influer sur sa valeur, et ainsi la gravité serait dépendante de la température des corps, ce qui est reconnu être absolument faux.

Réponse.

La réponse à cette objection n'est pas difficile. Il faut en effet considérer la gravité relativement aux masses et aux volumes. Nous disons que la masse restant constante, la gravité doit aussi rester constante, malgré le changement de température, et que toute la variation se réduira au changement de volume. Nous avons déjà vu (livre I[er]) comment les capacités caloriques et autres propriétés de la matière sont liées aux volumes, ainsi donc la gravité ne saurait se comporter diversement. Une augmentation de force vive élémentaire fera que sous un même volume il y ait moins de matière pesante, l'expérience a montré qu'il en était ainsi, mais elle ne pourra nullement augmenter le nombre des tourbillons élémentaires eux-mêmes, qui dans notre théorie représentent le nombre des atomes ou la masse. Ainsi donc, un mètre cube d'une substance à une température donnée quelconque, aura un poids déterminé, et à une autre température un autre poids, mais en faisant abstraction du volume, le nombre des molécules du corps entier étant resté constant, la tendance à se réunir dans toute la masse ne sera pas changée.

Influence de la chaleur sur la gravité.

On peut exprimer cela encore de cette autre manière : en ajoutant de la force vive calorifique à un système moléculaire quelconque, le travail que nous produisons se réduit à un éloignement des centres, et ainsi ce qu'il est possible d'obtenir, c'est une *diminution de la gravité dans un certain espace défini*. Soit un cube ayant 1 mètre de côté, on le chauffe, son volume augmente, une portion de matière est expulsée du volume du mètre cube, et réellement dans cet espace *la gravité est moindre*. Sous ce rap-

port, il est permis de dire que la chaleur diminue la gravité dans un espace donné, en diminuant la quantité de matière que peut renfermer un certain volume. Mais cela n'altère en rien les atmosphères primitives produites par le mouvement primordial; mieux encore, cela suppose qu'elles subsistent et se renforcent, et cet éloignement de leurs centres a pour résultat de faire cesser certaines influences dues aux enveloppes communes ou tourbillons généraux dont nous avons parlé dans le chapitre précédent. Toujours est-il que les centres primaires de mouvement demeurent sans nul doute inaltérables, et par suite la gravité dans ces centres, bien que, *par la chaleur*, *elle varie au sein d'un espace de dimensions déterminées*.

Réponse de l'expérience

Voilà à quelles conclusions on arrive en considérant la question au point de vue théorique. Lorsqu'on la traite expérimentalement, c'est-à-dire lorsque par l'observation on essaye de s'assurer si réellement la gravité ne subit aucune altération de la part de la chaleur ou énergie thermique, nous devons avouer franchement que l'expérimentation n'a pas encore fourni une réponse décisive. Des recherches ont été faites dans cette voie, nous le savons, mais il est permis de se demander si elles reposent sur des bases bien rigoureuses. En effet, nos expériences ne peuvent embrasser qu'une étendue fort restreinte de l'échelle thermométrique; c'est-à-dire que les variations de force vive, qu'il est en notre pouvoir de produire, sont bien petites relativement à l'énorme force vive dont sont animées les molécules, ainsi que nous l'avons reconnu plusieurs fois en comparant les énergies absolues des forces vives moléculaires avec les variations que nous leur faisons subir. En outre, la gravité est une portion bien minime de la force qui constitue les attractions moléculaires, si bien que, encore qu'il nous serait donné de pouvoir altérer ces forces plusieurs millions de fois plus que nous ne pouvons le faire, il n'en résulterait aucun effet sensible. Rappelons-nous que l'attraction réciproque de 2 kilogrammes de matière ayant une densité égale à la densité moyenne de l'eau, et placés à 1 mètre de distance, étant rapportée au mètre et à la seconde de temps, est 0,000 000 000 069 30. Cet exemple suffit pour nous montrer combien nous sommes loin de pouvoir reconnaître si la gravité est ou non altérée par la tempéra-

Petitesse de la force absolue de la gravité relativement aux forces moléculaires.

ture, attendu qu'à cet effet il nous faudrait connaître la valeur de cette force avec une exactitude de beaucoup supérieure à celle que comportent nos expériences. Quant aux planètes, nous ne savons pas si cet élément entre ou n'entre pas dans la constante que nous nommons *masse*, car les expériences ordinaires faites avec des pendules, ou avec la balance de Cavendish, n'ont pas encore été réalisées dans des conditions d'exactitude satisfaisantes, et il n'a pas été possible d'en faire varier les conditions dans des limites suffisamment étendues. Il est cependant un cas dans lequel la réduction de la gravité à la vibration peut avoir lieu, c'est celui dans lequel la radiation thermique augmentant l'oscillation élémentaire des atomes, et dilatant la sphère d'éther raréfié, l'action moléculaire ne serait pas seule troublée, mais aussi celle qui constitue la gravité. Aussi ne doit-on pas taxer d'absurdité ceux qui admettent la transformation possible de la chaleur solaire en force de gravitation, et qui, à l'exemple de Kepler, regardent la gravité et la chaleur comme dérivant probablement d'un seul principe. On pourrait citer à ce propos les diminutions de pression observées en acoustique dans le voisinage des corps vibrants, et les attractions apparentes des corps légers qu'on y a constatées.

Le plus ordinairement les ruptures d'équilibre, survenues à la suite des opérations thermiques, se résolvent en mouvements d'électricité, laquelle contrarie l'action de la gravité et en surmonte les effets; mais ces mouvements électriques ne sont que des phénomènes accidentels, qui modifient le corps seulement dans une très faible partie de la masse; à peine peut-on les considérer comme antagonistes d'une activité aussi générale que celle qui constitue la force fondamentale de l'univers.

Propagation de la gravité.

Quand on envisage la gravité comme une pression, on s'explique pourquoi il n'est pas possible de mettre en évidence sa propagation successive; en effet, pour y arriver, il n'y a que deux procédés également irréalisables dans l'ordre présent de la nature, savoir : la destruction ou la création d'une masse quelconque. La propagation successive du mouvement vibratoire, bien que très-rapide, se prête à l'observation, parce que le mouvement commence et finit avec chaque pulsation, et qu'il est arrêté par les corps opaques. Mais pour la pression qui donne lieu à la gravité, il en

est autrement; la modification du milieu ambiant est permanente et traverse tous les corps indistinctement; seulement, lorsque le centre se déplace elle se renforce à mesure qu'il s'approche d'un autre corps; et le changement ayant lieu peu à peu, et par simple effet différentiel, avec une vitesse immensément supérieure à celle du corps en mouvement, sa variation ne se distingue pas de celle-là même qui est propre au lieu occupé par le corps. Sans doute, en imaginant un nouveau centre de matière créé dans l'espace, il y a tout lieu de croire que l'action de gravité emploierait un certain temps à se transmettre à distance comme le fait l'onde électrique en parcourant un fil; mais toute vérification de ce genre dépasse les limites de notre observation.

La gravité imprime la même vitesse à tous les corps.

La gravité provenant d'une masse de grandeur définie imprime à tous les corps la même vitesse dans l'unité de temps. Ce fait, découvert par Galilée, prouve que les molécules, quelle que soit leur nature chimique, sont également sollicitées vers la terre, propriété qui s'accorde avec la remarque faite à propos de la chaleur, que les atomes élémentaires, quand ils sont de masse égale, doivent avoir une capacité calorifique égale; cela revient à dire que dans les deux cas l'inertie est la seule force à surmonter, et qu'une quantité donnée de masse et de vitesse produit toujours la même quantité de travail, que ce soit en produisant la dilatation d'où naît la gravité, ou en excitant la vibration thermique. Un tel résultat est un argument qui confirme une fois de plus la validité du raisonnement sur lequel nous avons fondé la théorie de l'unité des forces physiques, dont le principe fondamental est de constituer le siége des forces, non dans les molécules elles-mêmes, mais dans le milieu environnant.

Autres hypothèses pour l'expliquer.

Dans ces derniers temps, plusieurs auteurs ont cherché à expliquer la gravité par les mouvements vibratoires. M. Keller en France et M. Challis en Angleterre; le premier a comparé l'effet des mouvements vibratoires sur les atomes matériaux à l'effet du flux et reflux de la mer sur les corps flottants : il s'appuie sur ce que l'onde qui, arrivant, pousse un corps étranger, perd une portion de sa force vive, lui communique une impulsion qu'elle ne peut plus recouvrer en se retirant. Il paraît cependant que de cette action il en surgirait plutôt une répulsion qu'une attraction.

M. Challis croit avoir démontré par le calcul que par ce mouvement du fluide éthéré, on aura une répulsion si l'onde est plus petite que la dimension des atomes, mais on aura une attraction vers le centre de mouvement si les ondes sont considérablement plus grandes que les atomes eux-mêmes. Cependant les savants compétents ne s'étant pas prononcés sur la validité de ces démonstrations et sur les conditions hypothétiques de ce fluide, nous ne changerons pas notre manière de voir, et nous attendrons le résultat des efforts des savants qui aujourd'hui ne se refusent plus à attaquer cette place encore incomplétement conquise. Nous observerons seulement qu'en général on reconnait la nécessité d'admettre que la gravité est l'effet d'un milieu. Ce n'est donc pas dans les centres d'attraction eux-mêmes, mais dans l'espace étendu autour des corps attirés, qu'il faut chercher les causes du mouvement acquis par les corps pendant leur chute vers les centres. Une planète en tombant vers le soleil acquiert une certaine quantité de force vive par la réaction du milieu environnant, mais une égale quantité de force vive est perdue par le milieu, car, de même que lorsqu'un corps pesant monte dans l'eau par la poussée de ce fluide, le travail positif qui l'a élevé vers la surface est précisément égal au travail négatif développé dans l'eau pour se déplacer et soulever le corps.

Résistance du milieu.

On comprend encore pourquoi, à cause de cette réaction du milieu environnant, il peut se faire que l'inertie de l'éther, insensible lorsqu'il sagit de masses compactes telles que les planètes, ne le soit plus lorsqu'il s'agit de masses réduites à un grand état de rareté. Évidemment alors, à la résistance tangentielle se pourra ajouter une résistance dirigée suivant le rayon, ce qui expliquerait certains phénomènes observés dans les comètes, qui jusqu'ici ont été attribués à une force répulsive émanée du soleil. Les formes de ces astres errants mettent hors de doute que la gravité n'est pas la seule force qui règne dans les espaces planétaires; si elle dérive de l'action d'un milieu, ce dernier produit très-certainement les accélérations des mouvements moyens des comètes et le rebroussement de ces jets qui se dirigent du côté du soleil. Les calculs de Plana ont démontré, à la vérité, que rien ne prouve l'existence d'une force répulsive lorsqu'on considère les mouvements du cen-

Autres forces dans l'espace.

tre de gravité des comètes à courte période, mais ils n'ont rien démontré relativement à l'explication des formes et autres phénomènes physiques que ces corps nous présentent[1].

Ces réflexions, loin de satisfaire notre curiosité sur la cause des forces cosmiques, ne font que l'exciter davantage, toutefois elles peuvent hâter la solution de ce problème délicat, pourvu que l'on ne se presse pas de conclure trop tôt. Les astronomes qui admettent un milieu résistant afin d'expliquer les phénomènes cométaires, le regardent comme différent de l'éther lumineux et acceptent volontiers qu'il est constitué par la lumière zodiacale; mais cette opinion n'est pas partagée par tous les savants.

Résistance de l'éther douteuse.

Il est bon cependant de faire remarquer que jusqu'à ce jour on n'a reconnu aucune influence sur la comète rétrograde de Halley, dont le passage au périhélie aurait dû présenter un retard de sept jours, d'après les calculs de Rosemberg, si elle avait éprouvé une résistance égale en intensité à celle que subit la comète de Encke[2]. Il est encore manifeste que la réaction doit dépendre aussi de la force spéciale avec laquelle les diverses comètes lancent leur matière par effet d'expansion, laquelle force n'est pas assurément la même dans toutes. De là, cette espèce de force élective soupçonnée par Faye, qui, suivant qu'elle est d'une nature ou d'une autre, donne naissance à des queues de forme variée, etc. Les observations récentes faites sur les étoiles filantes et leur connexion avec les comètes ont prouvé qu'il n'y a pas communauté d'origine entre ces astres et la matière qui forme notre système planétaire. Nous avons aussi constaté que les comètes en partie sont gazeuses et donnent un spectre simple analogue aux spectres des nébuleuses et des substances chimiques pures en vapeur. Il y a donc là des forces en jeu très-différentes de la gravité, et, conséquemment, il ne faut pas s'étonner si elles présentent des phénomènes que la gravitation seule ne permet pas de calculer.

Théorie de M. Heinrichs.

Comme complément de ce que nous avons dit de la résistance du milieu planétaire, il ne sera pas hors de propos de rappeler ici

[1] Plana, Mémoire sur l'intégrabilité des équations différentielles relatives au mouvement des comètes, dans l'hypothèse de M. Faye, 1860. (*Ac. de Turin*, t. XXI, sér. II.)

[2] Il a été reconnu que la prétendue résistance, à laquelle on croyait soumise la comète de Faye, n'existe pas ; la différence résulte des perturbations ordinaires, comme on l'a établi par des calculs plus rigoureux.

les récents travaux de M. Heinrichs. Ce savant pense qu'il existe réellement une faible résistance de la part de l'éther lumineux, mais si petite que son effet sur les planètes ne se manifeste qu'avec une lenteur excessive, à cause de la masse et de la densité très-grande de ces astres. Si par exemple chaque année la terre se rapprochait du soleil de 10 pieds anglais (3 mètres environ), la durée de l'année serait accrue d'une seconde en mille ans. Or l'astronomie est bien loin de pouvoir assurer qu'un effet de ce genre n'existe pas. Le même auteur regarde comme une preuve de cette résistance des espaces célestes le fait que les distances des planètes au soleil, bien que sensiblement représentées par la loi de Titius[1], ne le sont cependant pas exactement; et les planètes comme les satellites qui s'écartent le plus de la loi, sont précisément ceux sur lesquels, d'après sa théorie, la résistance du milieu interstellaire exerce l'influence la plus marquée. Probablement à l'origine la loi en question se vérifiait rigoureusement, et à présent elle se trouve en désaccord avec l'observation, à cause de la résistance de l'éther. De même que les couches géologiques qui, lors de leur formation, se sont déposées horizontalement, ont été plus tard soulevées de diverses manières par des causes secondaires, ainsi cette loi se trouve maintenant troublée et pour ainsi dire déformée[2].

De ces principes résulterait encore que les systèmes secondaires les plus éloignés du soleil sont les plus anciens, conséquence parfaitement en accord avec l'hypothèse de Laplace, qui considère notre système planétaire comme formé aux dépens d'une immense nébuleuse.

Sans donner ces théories comme des certitudes, nous dirons que les phénomènes physiques accessibles à nos moyens d'observation démontrent réellement la résistance du milieu éthéré au sein de la matière pesante, dans les cas où il est animé d'une vitesse et d'un mouvement extraordinaires, ainsi que cela se voit dans les expériences d'induction électro-magnétique; mais, pour

Insuffisance de la théorie astronomique.

[1] La loi que l'on a pris l'habitude d'appeler loi de Bode doit être nommée loi de Titius. Cette prétendue loi a été indiquée pour la première fois dans une traduction allemande de la *Contemplation de la nature*, de Bonnet, publiée à Wittemberg, par le professeur Titius. (*Note du traducteur*.)

[2] Heinrichs Silliman, *American Journal*, jan. 1864.

ce qui est des planètes, on ne peut réellement encore rien décider. La résistance d'un milieu, en diminuant les axes transverses, et par suite en altérant les mouvements moyens, changerait les rapports de tout le système planétaire, y compris la durée des rotations; et alors nous ne nous en apercevrions pas, vu la période peu étendue des observations exactes dont les résultats sont conservés. Le seul moyen de reconnaître si les proportions du système solaire varient réellement consisterait à effectuer de temps en temps des mesures de parallaxes. Or la détermination de cet élément, même pour le soleil, est tellement incertaine, qu'on a cru nécessaire de l'augmenter de $\frac{1}{30}$ dans le cours de l'année 1863, et l'on a augmenté également un peu la parallaxe de la lune[1]. Mais on ne peut tirer de là aucune conséquence sérieuse. Cette correction a été faite non pas à la suite d'observations reconnues plus exactes que les premières : c'est surtout une correction de calcul. La trop faible valeur de la parallaxe qu'on avait adoptée d'abord, résultait de la façon inexacte dont on avait interprété les observations, celles-ci, mieux discutées, ont permis de ramener la parallaxe à sa juste valeur. Ce fait ne permet donc pas de conclure à une variation quelconque de la distance du soleil à la terre, mais il est très-propre à montrer toutes les difficultés du problème. Cette correction du reste était commandée par d'autres considérations théoriques tirées des perturbations planétaires, et de la vitesse de la lumière déterminée dans ces dernières années par des expériences directes. L'observation récente d'une apparition de Mars a permis de mettre à profit toutes ces données; reste à savoir si les résultats obtenus seront confirmés par les passages prochains de Vénus sur le soleil.

Travail de la gravité.

La gravité étant un effet de mouvement, doit nécessairement donner naissance à tous les effets qui dérivent directement du mouvement. Nous avons vu, par exemple, que la force vive produite par la pesanteur se transforme en chaleur par le fait de la chute des corps, et peut ainsi engendrer toutes les forces liées à ce dernier agent. A la surface de la terre elle est en lutte continuelle avec les actions moléculaires, et sa pression est constam-

[1] *Month. Noties. R. ast. Soc.* London, 1864.

ment équilibrée par ces forces; de telle sorte que le repos absolu n'existe pas, il y a seulement un conflit incessant entre des actions opposées. Mais, nous demandera-t-on, le mouvement calorifique est-il convertible en gravité? D'après l'hypothèse adoptée ici, une telle transformation n'est pas impossible; car, puisque dans les deux genres de phénomènes les effets sont dus à un mouvement particulier, ces deux mouvements peuvent se convertir l'un dans l'autre, de même que dans un corps en rotation le mouvement de *réflexion* peut devenir *progression*, et réciproquement.

Constance de l'énergie dans le système solaire.

Le problème de l'équilibre de la force dans le système solaire et de la permanence de la température du soleil, a toujours été une question scientifique de premier ordre; aussi a-t-elle exercé la sagacité de tous les philosophes. Newton croyait que les comètes étaient destinées à restituer au soleil la matière qu'il perdait par l'émission lumineuse. Aujourd'hui qu'on a prouvé que la lumière est un mouvement, on a cru trouver une cause de réparation de l'énergie mécanique perdue dans la force vive que développeraient les aérolithes par leur chute sur le soleil. (Mayer.) Mais cette hypothèse soulève de nombreuses difficultés. Au contraire, sans recourir au choc de masses pesantes, on arrive à concevoir parfaitement le maintien de l'équilibre par la réaction réciproque des parties du système. A la vérité, ici la difficulté est plutôt théorique que pratique. En parlant de la dissociation, nous avons calculé que le soleil peut continuer à rayonner plusieurs millions d'années durant, sans que sa température diminue d'une quantité perceptible, ainsi nous ne pouvons pas savoir si la température est ou non constante. D'ailleurs, rien ne prouve qu'elle doive nécessairement rester *éternellement* invariable.

Compensations probables.

L'architecte suprême, qui par les voies les plus diverses a assuré ce que nous appelons régénération de la matière, c'est-à-dire la conservation de son activité au milieu de ses transformations incessantes, n'a certainement pas laissé sans causes réparatrices la source d'où dérive toute force vive à la surface des corps du système planétaire. On a bien établi qu'une équivalence réciproque doit exister, mais il est difficile de décider si elle est telle, qu'elle soit en progrès et en activité continue, ou bien si la compensation s'établit à des époques déterminées, à des moments critiques irré-

guliers, ainsi que cela se passe dans les systèmes d'ordre inférieur, ou vraiment si tout doit s'accomplir par une dissipation continuelle de l'énergie des centres plus puissants, aux plus faibles, jusqu'à ce que le tout arrive à un équilibre absolu, et par là à une cessation d'activité. Notre science ne peut le savoir, parce que là le temps se compte à la mesure de celui pour qui « *mille années sont comme le jour d'hier qui vient de s'écouler.* » Aussi il est rationnellement permis de supposer que le soleil peut être soumis à des variations alternatives dont les périodes sont telles que leurs lois nous échappent complétement. Une chose certaine aujourd'hui, c'est que, pour trouver la source de la température solaire actuelle, il suffit de la considérer comme résultant de l'agglomération de cet astre et de sa condensation aux dimensions présentes. Cette agglomération dérive de la chute de la masse de l'astre central des limites de la nébuleuse primitive à la distance actuelle du centre, et cette chute a suffi à développer non-seulement la température actuelle du soleil, mais une température incomparablement plus grande ; on calcule que la condensation qui diminuerait son volume de 1″ suffirait à développer autant de chaleur qu'il en perdrait en dix-huit mille ans !

En résumé, l'éther est probablement la cause de la gravité, et bien que répandu dans tout l'espace stellaire, il n'oppose à la marche des planètes aucune résistance sensible, soit à cause de sa très-faible inertie relativement à l'énormité des masses planétaires, soit, comme l'avait admis Fresnel et comme semblent l'indiquer les récentes expériences de Fizeau[1], parce qu'il possède autour du soleil, dans chaque zone planétaire, une vitesse à très-peu près égale à celle des planètes elles-mêmes. Pour les comètes au contraire, si elles éprouvent de la part de l'éther une résistance, cette résistance est d'une qualité telle, qu'elle est d'une action spécifique qui n'affecte pas le principe de la gravité, mais se traduit sous des formes compliquées jugées analogues à une répulsion solaire. A cause de l'inclinaison considérable de leurs orbites et leur direction quelquefois contraire au mouvement du fluide éthéré, la circulation de l'éther pourra bien gêner leur transport dans l'espace. Du reste, les phénomènes magnétiques confirment Conclusion.

[1] Fizeau. *Comptes rendus*, 1859, vol. XLIX, p. 717.

dans l'espace la présence d'autres forces différentes de la gravité; elles confirment aussi nos vues sur le mouvement circulatoire de l'éther. Que l'on ne nous reproche pas de ressusciter les tourbillons de Kepler et de Descartes, car pour nous l'éther n'est pas la cause agissante de la translation des planètes, il les accompagne seulement, et ainsi ne donne lieu à aucune résistance sensible pour leurs masses très-grandes.

Voilà ce que nous voulions dire relativement à cette mystérieuse force de gravitation, et sans prétendre résoudre un problème aussi difficile, nous osons espérer que dans un avenir peu éloigné on arrivera à une solution complète, qui ne s'écartera pas beaucoup des principes théoriques exposés dans ce chapitre.

CHAPITRE V

DES FORCES ORGANIQUES.

Les êtres organisés sujets aux forces physiques.

Les êtres organisés envisagés sous le rapport de leurs fonctions matérielles, réactions chimiques et mouvements, sont soumis à l'empire des agents physiques, et comme tels satisfont au principe fondamental de la dynamique, que le mouvement ne naît jamais de rien et qu'il résulte toujours d'un autre mouvement. Nous avons déjà vu que les radiations solaires sont la cause presque exclusive du travail végétal au sein des plantes; par une opération purement mécanique elles préparent les composés organiques, après quoi leur force vive reste éteinte. L'effet des vibrations lumineuses est ici comparable à ce qui arrive, lorsqu'un petit monticule de sable est déposé sur une plaque élastique de façon à n'en recouvrir qu'une très-faible étendue. Aussitôt que la plaque entre en vibration, son mouvement de frémissement se communique aux grains de sable, qui peu à peu se répandent sur toute la surface et s'arrangent en figures géométriques. La mécanique végétale est liée à des conditions que nous ne connaissons pas et que l'on renferme dans le mot de *vitalité*. Un jour viendra où ce mot pourra être interprété dans son véritable sens mécanique, mais, pour le moment, toute tentative de le faire serait illusoire.

Les végétaux ont la grande mission dans la nature de détruire les combinaisons faites par les animaux et de préparer ainsi des sources d'énergie potentielle en utilisant la grande énergie cosmique du soleil. Ce point est actuellement hors de doute; de tout côté on entend dire aujourd'hui que c'est la force vive du soleil *qui, emmagasinée dans les dépôts de charbon, alimente nos machines.* Or, il importe de bien préciser la véritable signification de cette manière de parler; voici comment on doit l'entendre. Il a été établi ci-dessus que l'acide carbonique est une combinaison chimique des plus intimes, c'est-à-dire que les atomes élémentaires sont fortement serrés les uns contre les autres. Malgré la stabilité de ce corps, le soleil agissant par l'intermédiaire de l'organisme végétal, le décompose et le transforme en d'autres moins stables, résultant de l'association des éléments de l'acide carbonique avec ceux de l'eau. Durant cette opération, la force vive des rayons solaires s'éteint[1], car le travail exécuté ayant pour objet d'augmenter la distance qui séparait les atomes du carbone de ceux de l'oxygène, est du même genre que le travail qui produirait l'élévation d'un corps grave à une certaine hauteur au-dessus de la surface d'une planète. Quand ces matériaux une fois formés sont abandonnés à eux-mêmes, dans des conditions que nous ne connaissons encore que très-imparfaitement, ils se transforment en houille, laquelle à son tour, soit par un travail naturel, soit à la suite d'un traitement artificiel spécial (la calcination dans une cornue à gaz, par exemple), peut devenir charbon pur; dans l'un ou l'autre cas, cette élaboration plus avancée nécessite un travail thermique. Le carbone étant parvenu à cet état, des physiciens modernes disent qu'il tient emmagasiné une grande quantité de force vive, ce que l'on doit entendre ainsi. Pour isoler le carbone et le rendre indépendant des autres éléments auxquels il était combiné, il a fallu dépenser une grande force vive, car, comme nous venons de le dire, le travail accompli est comparable à celui dont l'effet serait l'arrachement d'une certaine masse de la matière d'une planète et son élévation à une hauteur telle que celle-ci soit désormais sans action sur elle. Il importe donc de ne pas prendre dans un sens erroné l'expression

Rôle des végétaux.

Emmagasinement de la force solaire.

Force disponible des combustibles.

[1] Livre II, ch. VI.

introduite depuis peu par la thermodynamique dans le langage de la science. La molécule de charbon n'a pas en soi la force vive, dépensée à la mettre en liberté, pas plus qu'une pierre, élevée au-dessus du sol, ne renferme une quantité de mouvement ou de force vive égale à celle qui l'a élevée à la hauteur où elle se trouve. Mais de même que la pierre, en tombant sur la terre, reproduit, sous forme de chaleur ou de toute autre force, la force vive qui l'en avait séparée; de même quand la molécule de charbon, jadis arrachée à la combinaison, se précipite de nouveau vers l'oxygène, elle restitue la force vive qui, fournie par le soleil et nos fourneaux, avait opéré son isolement, et cette force vive se manifeste comme chaleur pendant le conflit moléculaire de la combustion. Si bien qu'en réalité le charbon nous rend la force vive qu'il a reçue antécédemment du soleil, et il est permis de dire que le charbon est un dépôt de force, comme une masse d'eau élevée à une certaine hauteur est un réservoir de force. Il est évident que par là on renferme sous une forme concise une longue suite d'idées, qu'on résume mieux avec le mot de force disponible. Dans l'une et l'autre expression, il est manifeste que la *force* ne se trouve pas dans la molécule elle-même, mais dans *ses relations avec le milieu* dans lequel elle est plongée. Il est bon d'avoir rappelé ici ces explications pour ceux qui n'auraient pas lu, ou assez médité sur ce que nous avons dit précédemment, car on serait sujet à des interprétations absurdes des phrases modernes.

Force vive directe.

Outre l'action relative au milieu, la molécule elle-même peut acquérir réellement une force vive plus puissante. Une manière d'emmagasiner une *force*, c'est d'augmenter la rotation moléculaire comme il se fait dans nos volants; cette cause n'est pas étrangère sans doute aux actions dont nous parlons.

Force animale.

Dans les animaux ce sont les aliments qui, en brûlant au sein de l'organisme vivant, engendrent la puissance motrice nécessaire à la circulation des fluides au sein des tissus vivants, et de plus celle qui est dépensée en mouvements extérieurs; si bien que dans les moteurs animés comme dans les autres, il y a conversion de la chaleur en mouvement[1]. La chaleur n'est pas la seule forme

[1] Voy. liv. I.

de force qui se développe dans les animaux, certaines classes possédant encore l'action électrique; mais, comme la fatigue épuise l'activité des premiers, ainsi la décharge affaiblit les seconds; ainsi les animaux qui pour se défendre ou se nourrir lancent contre leurs adversaires les commotions électriques, tombent dans un état d'épuisement et d'affaiblissement remarquable après des décharges réitérées. Les physiologistes ont prouvé que les combustions internes s'accomplissent au sein des muscles, et non dans le poumon, comme on le croyait anciennement, la fonction de cet organe étant de permettre au sang de se débarrasser de l'acide carbonique et d'absorber sans cesse une nouvelle quantité d'air vital. Admirable opération dont le mécanisme est maintenant bien connu, surtout depuis que la théorie mécanique de la chaleur a prêté son appui à la physiologie.

Conditions de l'organisme.

Cet élément de l'activité des êtres vivants, pour être des plus importants, n'est cependant pas le seul; il faut aussi tenir compte d'une action spéciale, liée visiblement à une certaine disposition moléculaire, laquelle, une fois établie, permet à cette action de se continuer tant que les matériaux aptes à l'élaboration ne font pas défaut, et que la disposition est conservée intacte. C'est cette disposition nécessaire que nous nommons *organisme*.

L'organisme suppose comme condition première une disposition convenable, qui en rende les parties constituantes capables de produire un double effet : 1° une action extérieure; 2° une action intérieure qui assure la conservation du mécanisme lui-même. L'observation prouve que cette disposition ne peut spontanément prendre naissance au milieu de la matière brute, qu'elle dérive de ce que nous appelons un germe. Ce germe suppose des conditions qui ne peuvent être réalisées par une simple combinaison s'effectuant d'après les simples lois qui régissent les molécules de la matière inorganique.

Comparaison.

Afin de rendre notre idée plus clairement, prenons comme terme de comparaison les machines ordinaires. On n'arrive pas à construire une machine à vapeur en mettant ensemble, fer, charbon, eau, etc.; il faut distribuer ces éléments d'après un certain ordre, subordonner les uns aux autres. Une expression empruntée au langage philosophique rendra notre pensée assez exactement, il

faut *leur donner une forme*. Cette forme n'a rien de substantiel, elle ne consiste qu'en une coordination convenable des parties; sans elle la machine n'existe pas : les parties employées ne pouvant d'elles-mêmes ni se façonner soit en tubes, soit en roues, ni s'adapter les unes aux autres, suivant tel ou tel ordre. Un *mécanicien* est indispensable, c'est-à-dire un agent extérieur doué de facultés supérieures à celles de la matière grossière, instruit des rapports abstraits à établir entre les quantités qu'il emploie; en un mot, un être *intelligent*. Une fois la *forme* donnée aux pièces de la machine, les agents physiques entrant en jeu pourront produire des effets, dont autrement ils n'auraient jamais été capables, Ainsi la pesanteur opérera contre elle-même, la chaleur appliquée à une extrémité du système déterminera un refroidissement à l'autre extrémité et ainsi de suite.

Application. Pareilles conclusions s'appliquent relativement à l'organisme : de l'union de l'oxygène, de l'hydrogène et du carbone de quelque façon qu'on les assemble, alors même que la loi des proportions est scrupuleusement observée, ne sortira jamais une molécule végétale vivante. On a obtenu certains des produits qui s'élaborent dans les tissus végétaux ou animaux, mais non les tissus eux-mêmes organisés. On a obtenu des substances *organiques*, une substance *organisée* jamais, et encore moins un *organisme*. La génération spontanément opérée par les seules forces de la matière brute est une impossibilité, et, jusqu'ici, elle n'est prouvée par aucune expérience exempte d'objections; il en est de même de la transformation des espèces, théorie d'après laquelle un organisme serait transformable en un autre : il est aussi absurde d'admettre de semblables idées que de croire qu'une montre puisse d'elle-même se changer en une machine à vapeur[1].

Transformation des espèces. Cette doctrine, du reste, est contredite par les faits et l'observation la plus élémentaire. Combien de siècles se sont déjà écoulés, et, malgré le croisement d'espèces voisines et même très-voisines, aucune nouvelle espèce féconde n'a pu être obtenue, et au con-

[1] Voy. à ce propos l'ouvrage de Flourens, en réponse à Darwin, qui est annoncé dans les Comptes rendus de l'Académie des sciences du 14 mars 1846, et l'ouvrage de Bianconi, intitulé *la Théorie darwinienne et la création dite indépendante*, Bologne, 1874; et le dernier mémoire d'Agassiz : *Evolution and permanence of types*. Al t. monthly, 1874.

traire les espèces modifiées, abandonnées à elles-mêmes, reviennent à leur type primitif. Mieux encore; ou bien les conditions de milieu, dans lesquelles se produit la nouvelle espèce, *exigent* la transformatiou de l'espèce préexistante, alors celle-ci doit périr, ou bien elles sont telles qu'elles n'*entraînent pas nécessairement* une transformation, et alors la nouvelle espèce ne se développera pas; à moins d'admettre un caprice de la nature, une volonté indépendante de l'absolue nécessité des circonstances; mais cela revient à croire à l'action d'une cause libre, et c'est précisément ce que l'on voudrait exclure. Il est impossible de faire valoir que les conditions nécessaires à la transformation, existent dans un lieu et manquent dans un autre; car le même individu qui se transforme, ne peut à la fois exister en deux lieux différents, et subir simultanément deux influences : l'une qui l'oblige à se modifier et l'autre pas. En pratique, un animal ne peut être par exemple ruminant et dans le même temps non ruminant : ces deux structures s'excluent et il n'y a pas d'intermédiaire assignable et possible avec la vie.

Argument des transformistes.

Comme dernière ressource, les défenseurs de la variabilité des espèces, poussés à bout, disent que la transformation s'effectue par degrés infiniment petits, compatibles avec les influences les plus diverses. Mais alors nous les prions : 1° de nous dire où sont ces variétés intermédiaires, qui, d'après eux, devraient exister en nombre infini; l'histoire naturelle, la géologie elle-même sont muettes sur ce point; et tout indique que ces divers termes de transition n'existent pas. Comment donc accepter une théorie qui n'a pour s'appuyer aucune donnée d'observation.

Impossibilité des degrés de transition.

En second lieu, nous disons que les degrés insensibles n'existent pas dans la nature, et seulement dans notre esprit. C'est notre esprit qui, faisant abstraction des particularités individuelles, crée les genres et les espèces exclusivement par la comparaison des idées générales. Mais dans la nature tout est individuel, et tout individu existant est en soi une réalité indépendante et qui n'influe pas directement sur l'existence des autres; un seul des caractères que l'on nomme habituellement secondaires ou accessoires, a une importance et une réalité tout aussi grandes que ceux qui sont regardés comme fondamentaux et de premier ordre.

Avouons donc que ces révolutions théoriques de l'école nouvelle sont insoutenables, et sont de pures imaginations, à l'appui desquelles on ne peut fournir aucune des preuves sérieuses que réclame la science véritable.

Quelques personnes supposeront que nous combattons ces idées pour des motifs religieux : mais il n'en est rien. A notre avis, de tels principes n'ont rien à faire ici : ils ne s'opposent pas à ce que l'on admette que Dieu puisse avoir doté la matière brute de telles particularités qu'elle se constitue dans un mécanisme particulier automate dans certaines circonstances. Les anciens scolastiques, quoique très-religieux, ont soutenu la génération spontanée; thèse qui fut rejetée aussitôt que la véritable science fut créée. La question ici est purement scientifique; nous combattons cette théorie, car elle manque de preuves directes pour l'établir empiriquement et rationnellement. Ainsi c'est avec raison que cette opinion a été stigmatisée par un des savants les plus compétents, M. Agassiz, comme un amas d'absurdités.

Série des créatures.

Il existe à la vérité dans la nature une admirable série d'êtres, un déploiement merveilleux de formes, les unes très-simples, les autres très-complexes, une variété infinie d'organismes, depuis les plus rudimentaires jusqu'aux plus élevés; mais les lois de la matière ne suffisent pas à donner la raison de cette diversité, et il est nécessaire de reconnaître un principe libre qui, dans le choix et la coordination des formes, a assigné, parmi l'infinie variété des formes possibles, celles qui étaient en harmonie avec les lois primordiales des forces physiques librement établies par lui.

Limites des forces physiques.

Plus on étudie la nature, mieux on voit que les formes de la matière brute sont limitées; plusieurs actions, regardées d'abord comme inorganiques, lorsqu'elles ont été mieux connues, se sont trouvées être liées au développement d'êtres vivants; telles sont les fermentations et les putréfactions. Ces actions sont dues au développement de plantes et d'animalcules ayant des dimensions très-petites, et une structure très-imparfaite, disons-nous, bien que leur mécanisme nous soit aussi inconnu que celui des organismes les plus élevés dans l'échelle des êtres. Un organisme, quel qu'il soit, est l'œuvre de l'*Éternel Architecte;* et ce que nous appelons la nature n'est autre que le travail et *l'art* de ce Maître

Suprême. C'est lui qui donne la forme à la matière organisée, comme il a donné l'existence et le mouvement primordial à la matière brute. Exclure cette action, sous quelque prétexte que ce soit, c'est se fermer la voie des explications, même pour les phénomènes où elles sont manifestes. Cela est si vrai que ceux qui ont voulu tout expliquer par la seule matière ont été obligés de la douer de *forces* et de *puissances actives* insuffisantes et très-variées pour satisfaire à ces besoins; et ils n'ont pas pris garde que ces forces contrastaient ouvertement avec le caractère fondamental de la matière qui est l'*inertie*. Quoi qu'on fasse, le dernier anneau de cette chaîne d'êtres admirables sera toujours relié au siége de la Divinité, pour nous servir de la célèbre allégorie d'Homère.

Admettre une puissance suprême et libre qui produit et règle la matière à son commencement, ce n'est pas dire qu'à l'enchaînement scientifique doive se substituer l'arbitraire, auquel cas la science devient impossible. La science, en effet, consiste à déduire l'effet de sa cause, et quand la loi demeure constante, cela est toujours possible. Avancer que les lois de la nature ne sont pas nécessaires d'une façon absolue, ce n'est pas soutenir qu'elles soient changeantes et soumises au caprice. L'Éternelle Sagesse qui les fixa dès le principe, les choisit telles que partout régnât l'harmonie. C'est à la connaissance de cette harmonie que l'homme emploie tous ses efforts. *Constance* dans la loi n'est pas synonyme de *nécessité*. Des philosophes, très-respectables du reste, ont confondu à tort ces deux notions, et de là ils ont tiré des conséquences absurdes. Ainsi, par exemple, voyant que toujours au moment où deux corps se choquent il y a transmission du mouvement de l'un à l'autre avec constance de travail perdu ou gagné, ils ont cru à une *nécessité absolue*, et comme en cherchant dans la nature de la matière elle-même ils ne trouvaient pas la raison du phénomène, ils ont eu recours à des forces intermédiaires et à des *activités* mises en jeu : êtres imaginaires et de pure fantaisie. Cette première création accomplie, ils ont jugé qu'ils pourraient bien se dispenser de l'action primitive de la Divinité et de son action conservatrice et providentielle.

Distinction importante.

Si ces philosophes avaient bien considéré les phénomènes dont

il s'agit, ils auraient vu que dans cette loi il y a sans doute *constance*, mais non *nécessité absolue*. Nous pouvons très-bien comprendre le cas d'un corps qui, en frappant un autre, s'arrête lui-même sans rien communiquer à l'autre : cela n'arrive pas, il est vrai; mais cette loi fondamentale de la nature ne prouve pas sa nécessité absolue : elle serait possible dans un autre ordre de principes.

Les lois du mouvement ne sont pas de nécessité absolue.

Les lois du mouvement, fixées par Newton, n'ont pas leur raison d'être dans l'essence de la matière, mais dans un acte libre de la Puissance suprême. Tous ceux qui ont cherché à en assigner la nécessité absolue ont échoué, ou, par une contradiction encore plus flagrante, ils ont attribué à la matière elle-même les propriétés qu'ils refusaient à un Principe libre, éternel et intelligent.

Du reste ces objections et ces difficultés viennent d'un principe erroné; on semble croire que le Créateur ait fait son travail primitif et imposé ses lois à la matière, et abandonné après le tout à lui-même, à peu près comme l'artiste laisse partir de son atelier la machine confectionnée! Cela est absurde! Tout ce que nous voyons de vie, d'existence actuelle, vit et subsiste par l'action immédiate de la même puissance qui l'a tirée du néant; de sorte que toute activité actuelle se résout finalement dans l'action même actuelle de la Divinité. Cela est bien connu, et sans tomber dans les erreurs du panthéisme, on doit admirer cette toute-puissance non-seulement créatrice, mais aussi conservatrice de la matière, de la vie et de la force[1]. Mais revenons à notre rôle plus modeste d'expositeur des forces telles que nous les reconnaissons sans vouloir nous élever à leurs principes.

Erreur contraire.

D'autres philosophes, au contraire, sont tombés dans l'autre extrême. Ils ont prétendu que dans les corps vivants et organisés les forces physiques n'agissent pas, et ils se sont mis ainsi en contradiction avec les faits les plus évidents.

Négation des forces physiques dans l'organisme.

Les forces physiques et chimiques ordinaires servent à la conservation de l'être organisé, à son accroissement et à sa reproduc-

[1] *In ipso vivimus, movemus et sumus*, disait saint Paul. Cette pensée éminemment philosophique est bien propre à nous faire concevoir une grande idée de la divinité, idée qui est peu développée dans le vulgaire. Dans une conférence astronomique, l'auteur de ce livre ayant insisté sur ce point important, un des auditeurs s'en déclara scandalisé, en causant avec un théologien français éminent; celui-ci lui répon-

tion; envisagé sous ce rapport, un être vivant parcourt une série de phases parfaitement comparables, au moins, tant que nous le permet notre faible vue, à ces machines dont le mouvement est entretenu par un ressort ou une pile électrique; une fois montées, elles exécutent une série de mouvements déterminés jusqu'à ce que le ressort soit détendu, ou la pile épuisée.

Source de cette erreur.

On doit éviter l'exagération dans un sens comme dans l'autre, et s'il ne faut pas refuser aux forces physiques l'activité qu'elles possèdent, pas davantage il ne faut leur attribuer celle qu'elles n'ont pas. Envisagés superficiellement, certains phénomènes de la matière brute semblent indiquer qu'il existe en elle une autre substance, un principe différent de la matière; ainsi les anciens croyaient à la présence d'un esprit dans l'ambre frotté et dans l'aimant; mais une analyse plus rigoureuse des faits a ramené ces forces à n'être comme toutes les autres que des mouvements spéciaux de la matière. Il en est de même de la force végétale qui résulte d'un organisme particulier. Mais ni l'organisme ni toutes les forces qui opèrent en lui, ne nous donneront jamais la raison du principe de la sensibilité et de la conscience, et encore moins du principe intelligent auquel tel organisme est associé.

L'idée de *force* est en soi une idée confuse, équivoque, *nébuleuse* pour ainsi dire, qui cache on ne sait quel mystère; si bien qu'elle prête facilement au sophisme et rend possibles les explications les plus opposées d'un même fait. En examinant les choses de plus près et avec plus de précision, on reconnaît que les forces de la matière se réduisent au mouvement. Mais plusieurs des phénomènes que nous voyons se produire dans les animaux, et ceux auxquels participe notre propre individu, sont tels qu'ils ne peuvent être rapportés seulement au jeu des forces régissant la matière brute; donc partout où ces phénomènes se traduisent à nous, il est nécessaire d'admettre une autre espèce de forces. Cette espèce d'ordre supérieur, de puissances, sera niée comme on a nié l'éther autrefois, mais enfin on finira par les admettre.

dit tout simplement : *Est-ce que vous croyez le bon Dieu un gentilhomme bien élevé?* L'illustre théologien, le père Frullet, peut-être ne fut pas compris, mais il prouva que la puissance divine diffère bien des emblèmes qu'emploient les artistes pour la représenter.

Nécessité d'admettre des puissances d'ordre supérieur aux forces physiques.

Cela devient surtout indispensable lorsqu'on examine l'ensemble des manifestations rationnelles de l'homme, car, suivant une remarque fort judicieuse de Tyndall (Discours d'inauguration de la Société britannique de 1868, section de physiqne et de mathématiques), quand même nous arriverions à connaître les mouvements qui, dans les fibres cérébrales, accompagnent nos sensations, il resterait toujours à expliquer comment nous avons la *conscience* de ces impressions. Entre cette conscience et la modification de l'organe s'étendra toujours un abîme, que le matérialisme ne pourra franchir, parce qu'il se trouve là en présence de quelque chose, qui diffère en tout de la transformation d'un mouvement en un autre.

Puissance intellectuelle immatérielle.

Cette conscience n'est, en somme, que la modification de l'être pensant, c'est un phénomène qui n'a rien de commun avec le mouvement, et qui, d'après le témoignage du sens intime, n'a rien de matériel. On a dit, et peut-être avec raison, que sans phosphore il n'y a pas de pensée, mais on peut ajouter que sans oxygène il n'y a pas de pensée non plus, car étant donné qu'une matière est nécessaire à la formation de l'organe perceptif, il ne s'ensuit pas que cette matière constitue la perception elle-même, c'est-à-dire la conscience. Ainsi l'étude attentive de la matière conduit à admettre en nous un principe immatériel, qui régit et commande. Jusqu'à quel point ce principe immatériel domine-t-il la matière? nous l'ignorons; et probablement c'est en exagérer l'importance que de vouloir, à l'exemple de quelques-uns, le substituer à toutes les forces physiques nécessaires au développement de l'organisme. Toutefois la divergence d'opinion qui règne encore sur la question de savoir quelles sont les limites du principe dominateur de la matière organisée n'autorise qui que ce soit à nier l'existence de ce principe.

L'unité des forces physiques ne conduit pas au matérialisme.

Quelques personnes se sont effrayées craignant que la doctrine de l'unité des forces physiques fraye la route au matérialisme: mais elles se trompent. De même que l'âme a besoin de la matière pour se mettre dans l'ordre actuel des choses en relation avec le monde extérieur, ainsi a-t-elle besoin de la force, et du mouvement qui accompagne cette matière pour agir sur les corps. Elle en peut disposer et le transformer, mais ne peut ni le créer ni le

détruire ni le réduire au néant, et la *force* du mouvement est autant indépendante de la volonté que la matière elle-même.

Ce que nous disons, acceptant le témoignage du sens intime, de l'existence en nous d'un principe différent de la matière, est encore applicable au reste de l'univers. Si au dedans de nous réside une force autre que la matière ; bien plus, si l'homme lui-même est constitué dans sa partie la plus noble par ce principe ; s'il n'est pas son propre auteur, évidemment la cause qui l'a produit aura, pour le moins, pareille qualité et capacité, c'est-à-dire personnalité, raison et intelligence, avec cette différence que, puisqu'on ne peut remonter indéfiniment la série des causes successives, l'une de celles-ci doit présenter à un degré suréminent tous les attributs que l'homme ne possède que par simple communication. **Puissance d'ordre suprême.**

L'étude des forces physiques amène donc à reconnaître comme nécessaire l'action immédiate d'un *Être supérieur* à la matière ; et il est également absurde de prétendre, à l'exemple de certains philosophes, expliquer les actes de l'intelligence par une activité de l'organisme, doué à cet effet d'une puissance extraordinaire, que d'expliquer, sans un principe supérieur qui l'ait produit, l'existence de ce monde si beau et si varié, dont avec tant de peine nous arrivons à pénétrer quelque secret.

L'homme ne peut comparer son œuvre à celle de son créateur, parce que ses moyens d'action sont trop grossiers, il ne peut mettre en œuvre que la matière pesante, et la forme qu'il lui donne pour l'adapter à ses machines se ramène constamment à deux types : la corde et le levier. Quand il utilise quelque autre agent, soit le mouvement moléculaire calorifique, soit le mouvement de l'éther, c'est par l'intermédiaire de systèmes matériels très-compliqués ; toujours est-il qu'il parvient ainsi à des résultats merveilleux ! L'application directe des mouvements moléculaires est tout à fait hors de notre portée, et même, à dire vrai, nous ne connaissons que très-imparfaitement le mécanisme de ces actions. Nous admettons des tourbillons, parce que c'est l'idée la plus simple que notre esprit se forme des mouvements dans les fluides ; mais quand il s'agit d'un assemblage de molécules organisées, chacune d'elles par la complication de ses mouvements et de sa structure est comparable à une de nos machines les plus **Limites de l'activité humaine.**

Dépendance de la vie et de la température.

savamment combinées. Car à voir une légère variation de température en plus ou en moins arrêter ou exciter tout le mécanisme moléculaire, et tous les systèmes organisés, au moins ceux qui ne sont pas des plus rudimentaires, ne jamais résister à la chaleur quand elle dépasse un certain degré, il est impossible de douter de l'énorme complexité de leurs mouvements internes.

Les végétaux sont de tous les corps organisés les plus simples. L'organe qui sert de base à leur développement est la cellule que nous voyons naître d'une autre semblable à elle, puis se multiplier et former d'autres organes par leur juxta-position. L'activité végétale exige pour s'exercer de la lumière, certains éléments minéraux, de l'humidité, etc.; que l'un de ces éléments vienne à manquer, et il se conservera intact pendant une longue suite de siècles, comme on l'a reconnu sur les graines trouvées dans les tombeaux égyptiens, puis reprendra le cours de son évolution, lorsqu'il se trouvera dans les conditions nécessaires à son développement. C'est là ce qui n'arrive jamais à l'animal parfait, il ne peut suspendre toutes ses fonctions sans périr. Les actions chimiques qui, dans les plantes, s'accomplissent sous l'influence de la lumière et de la chaleur, peuvent être imitées artificiellement dans nos laboratoires, les produits obtenus dans les deux cas sont semblables : ce que nous ne parvenons jamais à imiter, c'est le *mode d'action*. Sauf cela, il n'y a rien dans la végétation qui ne rentre dans le domaine de la chimie ou de la physique. Si bien que l'agencement organique associé au mouvement, d'après une certaine *forme*, permet d'expliquer les phénomènes de la vie végétale. Les anciens, très-enclins à tout traduire sous une image sensible, attribuèrent les fonctions des végétaux à une *âme végétante ;* mais rien n'empêche de les regarder toutes comme résultant du jeu d'une certaine disposition des parties animées par les forces physiques[1]. Assurément il ne nous est pas donné de comprendre tous les mouvements qui s'accomplissent dans un végétal et de saisir le secret de l'état d'agrégation de ses parties, mais autre chose est de comprendre comment arrive un effet et d'assigner la nature du principe causal.

[1] Voy. à ce sujet l'excellent article sur la nutrition, dans le *Traité de chimie* du professeur Purgotti; 3e édition, Pérouse (p. 18 et suiv. de l'Extrait tiré à part .

Activité animale.

Tout au contraire, dans les animaux existe un principe, qui, supérieur à la matière, en commande les réactions. Les forces physiques lui fournissent l'élément de première nécessité, c'est-à-dire le mouvement qui constitue le fond de tous les actes de l'organisme. Les effets de ces forces soumises à l'influence de ce principe ne sont pas les mêmes, que lorsqu'elles en sont affranchies, de sorte que dans les fonctions animales, les mouvements beaucoup plus complexes, beaucoup plus délicats que dans les fonctions végétales, sont pour ainsi dire d'un ordre supérieur. C'est le même principe qui fait passer une certaine quantité de mouvements d'un point de l'individu à un autre, qui fait que ce mouvement se communique aux objets extérieurs, tout en se conservant comme élément du mouvement général de la matière. Aux derniers degrés de l'échelle des êtres (dans les polypiers marins et les infusoires, par exemple), il est souvent difficile de décider si les mouvements sont automatiques ou volontaires, mais dans les classes élevées le doute n'est pas possible. En un mot, dans les animaux que le mouvement, qui est toujours le résultat du concours des forces physiques, joue seulement le rôle d'instrument, de moyen mis à la disposition du principe supérieur, et il est ordonné par ce principe en vue d'un but voulu. La comparaison suivante, bien qu'incomplète, est encore celle qui aidera le mieux à rendre notre pensée. Considérez une locomotive, quelque parfaite que vous la supposiez, jamais d'elle-même elle n'entrera en mouvement et ne se mettra à fonctionner avec régularité ; il faut le mécanicien qui ouvre la clef, gouverne le tiroir de façon à la faire avancer ou reculer, etc. De même les animaux doués de mouvements volontaires, non-seulement possèdent ce mouvement, cet attribut inséparable de la matière brute, mais en eux se révèle encore une puissance directrice, d'un ordre plus élevé que la matière. La vie envisagée au point de vue des phénomènes purement matériels, se réduit à un mouvement de parties fluides, ayant la propriété de subvenir à l'accroissement et au renouvellement des organes au sein desquels ils circulent. Que ce mouvement vienne à cesser dans l'être, aussitôt *il meurt*[1].

[1] Dernièrement un auteur nous a taxé d'inconséquence. Toutes les forces, selon nous, disait-il, sont mouvement. Les végétaux sont simple matière et mouvement,

Forces après la mort de l'animal.

Par là, quelques-uns seraient induits à croire que les forces agissantes dans l'animal vivant sont différentes de celles qui agissent après sa mort. Cette erreur a été très-bien combattue par l'illustre Mayer, fondateur de la thermodynamique. Il fait observer avec justesse que pendant la vie se produisent dans l'animal les mêmes réactions chimiques qu'on a dans l'animal mort : la seule différence est que l'animal vivant peut expulser ces matières devenues inutiles et préjudiciables à ses organes, tandis que mort il ne le peut pas. De là accumulation de matières non-seulement inutiles, mais nuisibles à l'économie, et qui, s'accroissant rapidement, produisent bientôt l'altération des organes eux-mêmes et les rendent incapables de faire les actions du corps sain et vivant. La preuve de ces assertions n'est pas difficile à fournir : tout le monde connaît l'air infect qui émane des corps vivants et la nécessité de le renouveler pour conserver la vie.

Quant la mort d'un animal est causée par une lésion traumatique d'un organe nécessaire à la circulation ou par l'obstruction des vaisseaux, les forces physiques demeurent libres d'agir sur la matière ; et même quand l'organisme n'est pas détruit par la violence de l'action extérieure, comme dans le feu, par exemple, les dilatations inégales causées par la chaleur qui n'est plus maintenue à un degré constant par l'action de la vie, troublent l'agrégation des parties ; l'humidité extérieure qui envahit les tissus, n'en étant plus empêchée par les circulations organiques, les altère, parce qu'elle y introduit des éléments étrangers ; et ainsi commence le lent travail de destruction.

Destruction des corps organisés.

Le plus ordinairement la décomposition d'un corps organisé

pourquoi n'en serait-il pas ainsi de l'animal? Et si cela est vrai pour l'animal brut, pourquoi pas pour l'homme? Laissons de côté cette espèce d'argumentation par degrés qui conduit en général à des absurdités affreuses. Contentons-nous d'examiner les extrêmes. Alors la nécessité d'une puissance nouvelle est frappante. La spontanéité non-seulement, mais l'intelligence, la conscience, la liberté demandaient un principe différent des pures forces physiques, et nous devons l'admettre. Nous retrouvons ici un cas parallèle à celui traité dans ce livre : un grand nombre de phénomènes physiques s'expliquent par la seule action de la matière pondérable : donc il faut pour tous rejeter l'éther! La logique la plus élémentaire condamne un tel raisonnement ; lorsqu'on a des faits de genres nouveaux *irrévocables et contradictoires aux causes connues*, il faut en admettre des nouvelles ; cela doit se faire avec d'autant moins de réserve que la pénétration de notre science n'est pas vraiment trop forte. (Voy. *Revue des cours scientifiques*. Janvier, 1871.)

survient parce que d'autres êtres organisés, d'ordre inférieur, se développent à ses dépens et se nourrissent de sa substance. Ainsi les mousses qui se développent sur les arbres morts, les vibrions et les autres infusoires infiniment petits qui déterminent ce que l'on appelle la putréfaction, sont les agents par l'intermédiaire desquels la matière organisée retourne au monde inorganique. Que l'on empêche ces actions de se produire, et la forme organique ne se détruit pas, ainsi que cela a été réalisé dans les magnifiques préparations anatomiques du professeur Brunetti de Padoue; il est donc faux que la matière organisée, pour subsister sous la forme qui lui est propre, doive être soumise à des forces spéciales; il faut seulement une action première qui dirige ces forces de façon à en obtenir le résultat à la production duquel l'organisme est destiné. La disposition matérielle, une fois réalisée, elle peut persister alors même que la vie a cessé[1].

But du végétal dans la création.

Le végétal, dans le grand édifice de la création, paraît destiné à organiser la matière inorganique, qui peut alors servir à l'animal. Celui-ci ne se *nourrit* pas et n'assimile que la matière déjà organisée, tant végétale qu'animale. Toutefois, il n'est pas encore démontré que le végétal ait, de par lui-même, la force nécessaire pour rendre organique celle qui ne l'est pas du tout. La nécessité de le nourrir avec de l'air tel qu'il est dans l'atmosphère, c'est-à-dire renfermant en abondance des émanations organiques, porte à croire que, pour *certaines fonctions* des plantes, il faut une matière ayant déjà subi une première élaboration. Jusqu'à quel point cette élaboration préalable est-elle nécessaire? On l'ignore. Et c'est là un problème digne d'attirer l'attention des observateurs. La plante est encore destinée dans l'économie de la nature à détruire ces combinaisons, qui, accomplies au sein de l'organisme animal et rejetées dans l'atmosphère, en changeraient bientôt la composition.

[1] Sur les ferments végétaux et animaux qui sont la cause des prétendues *forces putrides* ou de dissolution, voy. Pasteur. Comptes rendus 29 juin, t. LVI, 1863. Les ferments que l'on peut regarder comme végétaux *monas, bacterium*, etc., vivent dans l'oxygène et dégagent de l'acide carbonique. Les ferments animaux, *vibrions*, etc., se conservent dans l'acide carbonique, tellement qu'ici la relation qui existe sur une si vaste échelle entre les plantes et les animaux se trouve renversée. *Les extrêmes se touchent*. (Voy. p. 1191.) Ajoutons encore les *mucores* et les *mucédinées*, qui sont de véritables végétaux. La putréfaction diffère de la gangrène, parce que celle-ci est en quelque sorte une vie purement chimique (p. 1194).

Équilibre dans l'univers.

Ainsi un admirable équilibre règne dans l'univers, et la solidarité des animaux et des végétaux est si étroite, que la vie des unes est indispensable à l'existence des autres. Existence, mouvement, vie végétative, sensation, intelligence, tels sont les cinq termes de la création. L'Auteur suprême, alors qu'il donna l'existence à la matière brute, lui communiqua encore un principe d'activité consistant en un mouvement indestructible. Dans certains systèmes moléculaires, le mouvement devint la résultante d'une disposition spéciale, soumise tout entière à l'empire des forces physiques; dans d'autres groupes, des dispositions particulières déterminèrent des réactions progressives sous une loi déterminée tendant à une reproduction continuelle; dans une autre classe, les réactions de la matière furent réglées par un principe supérieur, auquel elle fut associée ; et à celui des êtres qui occupe le sommet de l'échelle, à l'homme seul, l'auteur de la nature donna la lumière de la raison, qui lui confère la puissance de se connaître lui-même, de connaître son Créateur, ses œuvres, les causes des choses, et enfin lui permet jusqu'à un certain point d'imiter le travail de la nature.

CONCLUSION

Au moment de mettre la dernière main à ce travail qui a dépassé de beaucoup les limites dans lesquelles nous avions espéré le renfermer, nous ne pouvons nous empêcher d'engager le lecteur à jeter un coup d'œil d'ensemble sur le chemin parcouru. Coup d'œil sur l'ouvrage

Si, au lieu de s'arrêter aux derniers chapitres où sont traités les sujets qui excitent le plus la curiosité, et auxquels nous attachons une importance seulement de second ordre, le lecteur a eu la patience de suivre la discussion dans tous ses développements, il aura reconnu facilement quels immenses progrès l'esprit humain a faits dans la connaissance de la nature durant ces dernières années.

En présence des résultats partiels fournis par l'expérimentation, il sera persuadé qu'ils nous tracent la voie à suivre pour arriver à envisager les forces régissant la pure matière d'une façon beaucoup plus simple et plus précise qu'on n'a pu le faire jusqu'à présent. Voie de progrès.

Le résultat le plus important de notre analyse peut se formuler en quelques lignes. Toutes les tendances abstraites, les qualités occultes des corps, les nombreux fluides imaginés jusqu'ici dans le but d'expliquer les agents physiques, doivent être bannis du domaine de la physique, *car toutes les forces de la nature dépendent du mouvement.* Résultat général.

Il est rationnel d'admettre que le mouvement revêt dans les parties élémentaires de la matière la forme la plus générale sous laquelle il se présente dans une masse finie, c'est-à-dire celle d'un double mouvement de rotation et de translation. Par cette double Mouvement élémentaire.

qualité il devient indestructible dans la masse, car la mécanique enseigne qu'en vertu de l'inertie, il se conserve indépendamment de toute action spéciale qui l'entretienne. L'énergie qui lui a été communiquée à l'origine par le Premier Moteur se conserve en raison du même principe qui assure la conservation de la matière. Si on nous presse pour dire quelle est la puissance qui a produit le mouvement primitif, nous n'hésitons pas à dire *cette Puissance est Dieu.*

Conservation de l'énergie.

Le principe, nommé par les physiciens modernes principe de la conservation de l'énergie, n'est au fond que le premier de ceux posés par Newton lorsqu'il formula les lois de la communication d'un mouvement, c'est-à-dire celui de l'égalité entre l'action et la réaction. Un corps complétement libre se meut naturellement en ligne droite et dans la direction de l'impulsion qu'il a reçue; si sur sa voie il vient à rencontrer une seconde masse, il lui communique son mouvement, et alors il exerce une action qui, passant du premier au second, est dite produire en lui une réaction égale. De ce principe résultent non-seulement les lois de l'échange de mouvement entre les corps, au sein desquels il ne se développe aucune force interne, mais encore celles qui règlent la communication par le moyen d'autres corps tels que les leviers, les cordes, etc., qui constituent les machines. C'est lui qui donne la raison des formules nommées principe des aires, théorème des moments, principe de d'Alembert. Ce dernier dit, en effet, que dans un système donné il y a constamment équilibre entre les forces perdues d'une part et celles acquises de l'autre, et par là les problèmes de dynamique se trouvent ramenés à de simples questions de statique.

Force vive.

Le même principe s'applique encore au cas où les résistances sont continues et naissent soit du frottement, soit de la cohésion, soit de la gravité, soit enfin de l'accélération du corps. En évaluant à chaque instant l'énergie de la cause agissante par le produit de la force mv et de la vitesse instantanée, il résulte à la fin d'un temps fini, le produit $\frac{1}{2} mv^2$ que l'on nomme force vive, ou énergie, qui est la mesure du travail actif; et en évaluant la résistance ou réaction par la vitesse communiquée dans le même temps aux parties du corps, multipliée par l'intensité des forces résistantes,

quelles qu'elles soient, c'est-à-dire en représentant le travail accompli par le produit de la force résistante et de l'espace parcouru à chaque instant, on trouvera constamment le travail passif égal au travail actif.

Extension de ces principes aux impondérables.

On n'a jamais émis le moindre doute sur l'exactitude de ces principes tant que l'on s'est occupé seulement du mouvement de masses pondérables, et il fut admis comme évident qu'avec de telles masses le mouvement perpétuel était impossible. Mais la nature mal déterminée, et du reste difficile à connaître, de certaines résistances et de quelques causes de mouvement, dites d'ordre physique, ne permettait pas d'appliquer ces formules à un grand nombre de faits, par exemple aux actions chimiques, à celles de l'électricité et de la lumière, et enfin surtout aux phénomènes de chaleur. Les recherches entreprises dans ces dernières années, ont prouvé la complète généralité des principes fondamentaux de la mécanique.

La chaleur mode de mouvement.

Les découvertes faites en optique, l'étude de la chaleur rayonnante avaient déjà persuadé les physiciens que le calorique est un phénomène de mouvement et qu'il devait en être de même de quelques actions chimiques ; mais le fait récemment démontré de la transformation du calorique en force mécanique avec abaissement de température, les a conduits à diriger leurs investigations dans une voie nouvelle. On a reconnu que l'égalité entre l'action et la réaction existe non-seulement lorsqu'il s'agit des mouvements finis des masses, mais aussi des mouvements moléculaires qui constituent ce que l'on appelle le calorique. Cette agitation des molécules est en nous la cause immédiate de la sensation de chaleur; en outre, la température et l'état physique des corps dépendent de l'intensité de la force vive animant les molécules, si bien que la température s'évalue d'après le travail des dilatations. C'est encore par le fait du mouvement calorifique que la matière passe à l'état de fluide élastique ayant pour caractère spécifique d'être expansif ; d'une manière générale de ce mouvement résultent les forces dites répulsives ou diffusives.

Forces attractives.

Après une étude plus approfondie des propriétés de la matière, la nature des forces qui, nommées ordinairement attractions moléculaires, déterminent la formation des corps et leur donnent

une forme déterminée, devint moins obscure, on reconnut qu'elles ne consistaient pas en des liens matériels réunissant les diverses parties constituantes, ni en des principes abstraits agissant à distance; mais qu'on devait les considérer comme un effet des mouvements qui animent les masses élémentaires. Tous les effets mécaniques et thermiques de la matière se réduisent simplement à changer des directions et à faire varier des vitesses dans les masses; et l'unique différence qui sépare les effets ordinaires de ceux d'ordre atomique réside en ce que dans les premiers, les mouvements sont très-apparents, tandis que les autres échappent à nos sens, vu leur amplitude excessivement petite. Et si parfois la translation moléculaire paraît manquer, il n'en faut pas conclure que l'effet est nul, car alors l'action s'épuise à modifier la rotation. Les plus petites masses moléculaires peuvent et doivent résister par cette même cause, et par la simple inertie, de même que nous voyons le tore d'un giroscope, par cela seul qu'il est en rotation, résister quand on cherche à changer sa direction, bien qu'il soit suspendu sur des supports d'une mobilité extrême.

Réciprocité des phénomènes.

En vertu de ces réactions le travail des forces au sein des masses est réduit à un simple effet dynamique, il doit donc être soumis à la loi générale de tous les mouvements. Au point de vue expérimental, une action mécanique quelconque se réduit au choc d'une masse, le choc des masses finies passant aux molécules intégrantes, se résout finalement en chaleur. Réciproquement de la chaleur dérive le pouvoir mécanique, sous forme soit de mouvement moléculaire chimique, soit de dilatation thermique, et tout se passe de telle sorte qu'une compensation parfaite s'établit dans le vaste ensemble de l'univers dont nous occupons un point; aussi serait-ce folie de prononcer sur ce qui passe aux dernières limites de la création, d'après la manière d'être de ce qui nous entoure[1].

Matière impondérable.

Parce que l'action de la matière pondérable est seule perceptible à nos sens, il ne s'ensuit pas qu'elle soit la seule dont il faille considérer les effets et l'influence. Il existe dans l'espace et à

[1] Parmi les objections faites aux doctrines ici exposées, se trouve la suivante : Comment les choses se passent-elles aux limites du monde créé? Nous avouons sur ce point notre complète ignorance, mais cela empêche-t-il d'admettre les faits démontrés d'une façon palpable?

l'intérieur de tous les corps une matière plus subtile, qui par son inertie est capable d'éteindre les mouvements des masses pondérables, et, en vertu de ses conditions d'équilibre et de pression, peut maintenir les masses pesantes à leurs distances respectives, d'autres fois déterminer leur rapprochement; en un mot, et d'une façon générale, elle agit comme un fluide.

L'optique démontre la présence de cette matière subtile dans tout l'univers., c'est cette matière qui par sa vibration produit non-seulement la sensation de lumière, mais aussi excite des actions thermiques et chimiques entre corps placés à distance. Ce milieu, répandu au dedans de tous les corps diaphanes et opaques, par ses mouvements de translation, est la cause des phénomènes qui constituent l'électricité dynamique et le magnétisme, enfin il entre en jeu dans les réactions chimiques. A l'état de flux il transporte la force vive d'un point à l'autre des masses mises en contact dans les systèmes voltaïques, et par ses pressions il donne lieu aux attractions et répulsions électro-statiques. Radiations. Électricité.

Ce milieu est formé par une substance qui essentiellement ne diffère pas de la matière commune, seulement il suppose une condition ou un état de la matière elle-même autre que celui sous lequel elle constitue les corps dits pondérables. L'état dont il s'agit est une complète désagrégation ou une atténuation telle que la matière, réduite à ses atomes élémentaires, pénètre partout, aussi bien dans les espaces planétaires qu'à l'intérieur des corps. Constitution de l'éther.

Quand la matière est dans cette condition, on la désigne sous le nom d'éther; elle n'a perdu aucune de ses propriétés essentielles. Elle est inerte et soumise à toutes les lois de la mécanique, et on ne peut l'appeler un agent immatériel que par un abus de mot, et seulement pour la contre-distinguer de la matière pesante. La résistance de l'éther aux mouvements de translation devient appréciable seulement dans des cas exceptionnels, alors que le corps est animé d'une vitesse énorme. L'éther ne paraît pas soumis à la gravité, parce qu'il est lui-même la cause de cette force et de toutes les attractions.

Le mouvement est la cause directe des répulsions, en tant que les molécules, si elles étaient libres et isolées, iraient en vertu de leur inertie se perdre dans l'espace, entraînées qu'elles seraient La répulsion cause les attractions.

par l'impulsion reçue à l'origine; ainsi elles se sépareraient les unes des autres, et s'écarteraient indéfiniment. Mais, ces parcelles étant multipliées à l'infini dans des espaces limités, leur propre mouvement devient une cause indirecte d'attraction, en ce sens que chaque centre de matière de masse différente formant l'atome simple, c'est-à-dire constitué par un assemblage d'atomes vraiment élémentaires, devient en même temps le centre d'une moindre densité au sein du milieu lui-même. D'où résulte un déplacement des centres plus facile suivant la ligne qui les unit que dans les autres directions, ce qui produit les attractions et les pressions environnantes. Suivant l'amplitude et l'intensité du mouvement, dans ces sphères dilatées, sous l'influence des rotations, prennent naissance à diverses distances les attractions desquelles dérivent les propriétés chimiques et moléculaires des corps, et celles qui gouvernent les mouvements des astres. Jusqu'à présent il nous est impossible de dire comment les choses se passent dans chaque cas particulier, spécialement dans ces groupes de matière qui forment les corps organiques. Dans ces groupes les équilibres sont très-instables et déterminés par des causes fort complexes et des influences souvent toutes différentes de celles qui agissent ordinairement sur la matière brute.

Mouvement et matière suffisent pour expliquer la nature.

Néanmoins, d'une façon générale, il est exact de dire que tout dépend de la matière et du mouvement, et nous revenons ainsi à la vraie philosophie, déjà professée par Galilée, lequel ne voyait dans la nature que mouvement et matière, ou modification simple de celle-ci par transposition des parties ou diversité de mouvement. Ainsi disparaît cette légion de fluides et de forces abstraites qui à tout propos étaient introduits pour expliquer chaque fait particulier. Il est vrai qu'à diverses reprises, surtout en Italie, plusieurs auteurs se sont élevés contre ces tendances scientifiques, mais nous avons aujourd'hui la satisfaction de voir les nouvelles doctrines défendues même par les savants les plus distingués des autres pays[1].

[1] Voy. le dernier ouvrage de Maxwell, *Electricity and magnetism*, où, au milieu de la plus grande réserve anglaise et d'une nomenclature particulière, la théorie de l'éther forme la base de l'explication de ces deux classes de phénomènes. Ceux qui aiment les discussions mathématiques pourront être satisfaits, quoique les principes ne deviennent pas plus claires pour cela.

Quoique nous nous refusions à admettre ces agents mystérieux, cependant jusqu'ici nous ne pouvons concéder que tous les phénomènes de la nature dépendent de ce seul principe nommé matière pondérable, et nous croyons indispensable d'admettre l'existence d'une autre condition de la matière, échappant à l'influence de la gravité, matière qui n'est peut-être que la même matière grossière et pondérable parvenue à un degré de rareté et d'atténuation extrême. C'est elle qui donne lieu par ses mouvements divers aux phénomènes de la lumière, de l'électricité, du magnétisme et de la gravité elle-même.

Si un jour on arrive à prouver qu'il est inutile d'admettre cette seconde condition de la matière, on ne fera que réduire toujours davantage le nombre des moyens dont la nature se sert pour arriver à son but, et cela ne saurait porter atteinte au principe posé par nous comme fondamental, qu'il suffit de la matière et du mouvement pour expliquer tous les phénomènes connus sous le nom de forces physiques.

Ce qui reste encore à faire.

Que l'on nous comprenne bien : nous ne voulons pas dire par là que toutes les questions sur les divers phénomènes de la nature sont résolues, et que dès lors de nouvelles recherches, et de nouvelles spéculations deviennent inutiles. Il reste encore à connaître comment les choses se passent dans une infinité de cas, par quel mécanisme s'accomplissent tels ou tels phénomènes spéciaux; comment les faits se ramènent à des lois semblables. Bien qu'on eût trouvé que les phénomènes célestes se réduisaient à des mouvements suivant des lois bien définies, on ne fut pas dispensé de poursuivre à grand'peine, durant une longue suite de siècles, l'étude de ces lois; semblable remarque est applicable à la mécanique moléculaire. En considérant combien est encore imparfaite la dynamique des fluides pondérables, on ne s'étonnera pas de l'obscurité qui enveloppe plusieurs questions relatives aux effets d'un fluide impondérable, et l'on verra quels nombreux travaux il reste à entreprendre pour parvenir à jeter un peu de lumière sur ces problèmes difficiles.

Dès l'instant où l'on aura compris que tout se fait par le mouvement, les recherches deviendront plus faciles, une nouvelle voie sera tracée qui conduira plus directement à la solution des pro-

blèmes, c'est-à-dire à l'explication des phénomènes, car un problème bien posé est déjà à moitié résolu. De même que la vraie chimie date du jour où fut reconnue la permanence des masses, de même on commença à donner une vraie théorie des phénomènes physiques seulement lorsqu'on songea à tenir compte de la quantité de mouvement ou de la force vive, et, pour l'avoir fait, les physiciens de notre époque ont attaché à leur nom une gloire impérissable.

But de la science.

Un phénomène sera réellement expliqué lorsqu'on connaîtra la *quantité* de travail dépensée à le produire, et le *mode* de transformation du mouvement qui lui donne naissance. Mais nous sommes loin d'une telle perfection.

Cependant nous avons vu quels grands progrès on a fait dans cette voie en calculant les équivalents des diverses forces; détermination difficile dans un grand nombre de cas, mais elle est toujours possible; et ce qui reste à trouver n'est pas affaire de principe, mais plutôt de déduction. La découverte de la théorie mécanique de la chaleur a rompu la barrière qui fermait la route à l'intelligence de la mécanique moléculaire; et grâce à ce principe une foule des faits connus depuis longtemps ont reçu leur explication naturelle. La vaillante phalange de chercheurs, qui s'est lancée dans la carrière et la parcourt à grands pas, parviendra rapidement au but tant désiré. Les travaux théoriques sur la lumière et le magnétisme avaient préparé le triomphe de la science moderne, que chaque jour voit grandir davantage.

Rôle modeste de l'auteur.

A nous, modeste admirateur de si beaux succès, il reste la satisfaction d'avoir mis sous les yeux du lecteur le résumé des faits qui forment l'héritage intellectuel que la génération présente va, en y ajoutant encore, transmettre à celle qui la suivra. Un simple coup d'œil, jeté sur les résultats obtenus au prix d'efforts sans cesse renouvelés, nous apprend que, dans la nature, tout se lie, et que tous les phénomènes de l'univers sont les innombrables anneaux d'une chaîne unique.

Lorsqu'on remonte ainsi aux principes fondamentaux, lorsqu'on cherche quelles sont les causes directes des phénomènes, on arrive bien vite à reconnaître la nécessité d'une *Cause première*, qui, par sa seule volonté, a dans l'origine assigné aux actions leurs limites

d'intensité et a déterminé leur direction. L'homme ne peut que scruter cette première volonté du Créateur de laquelle découle comme effet médiat tout ce qui se présente à nos regards; si, lors de l'examen d'une machine, nous exaltons d'autant plus l'habileté de l'artiste que le principe d'action est plus simple et que l'intervention de la main du machiniste est moins souvent nécessaire, combien plus devrons-nous admirer l'œuvre de l'éternel Architecte. Mais quel homme peut espérer porter ses regards aussi haut!

Les phénomènes discutés par nous sont les plus grossiers de ceux que présente la création, une infinité d'autres resteront toujours complétement inaccessibles à notre court entendement. Les forces étudiées par nous sont comme la matière première qui forme le magnifique édifice de la création. Mais il s'en faut de beaucoup que nous puissions nous en expliquer les détails, les ornements pour ainsi dire, tels que l'organisation végétale et animale. Autres sujets à discuter.

L'harmonie, la corrélation dans les quelques parties accessibles à notre intelligence, apparaît d'autant mieux que nous les envisageons débarrassées de la multitude des faits de second ordre, qui nécessairement surchargent les cours élémentaires. Du point de vue un peu élevé auquel nous nous sommes placés, pas assez cependant pour effacer les détails, nous avons cherché à nous former une idée claire et précise de ce qu'est la chaleur, la lumière, l'électricité, le magnétisme et les forces moléculaires. Nous avons vu que toutes ces actions sont purement mécaniques; d'où la conjecture qu'il en est de même de la force à laquelle obéissent les astres, et bien qu'il nous soit impossible de pénétrer jusqu'au fond d'un problème aussi difficile, nous avons montré qu'il n'y a aucune absurdité à expliquer la gravitation par le mouvement.

La mécanique moléculaire est aujourd'hui dans le même état où se trouvait la mécanique céleste au temps de Kepler. Ce grand homme connaissait les lois particulières des mouvements, mais il ignorait celle qui les comprend toutes; à Newton était réservée la gloire de découvrir le principe. Dans un avenir prochain, les ombres qui enveloppent ces vastes et ardus problèmes, disparaîtront,

nous en sommes convaincu ; aussi notre seul but en écrivant ces pages a été de solliciter les recherches dans la voie nouvelle ; et nous dirons avec le poëte :

> ... Fungar vice cotis, acutum
> Reddere quæ ferrum valet exsors ipsa secandi.
>
> (Horace.)

Février 1874.

FIN

ERRATA

Page 36, ligne 10 : *la formule doit être corrigée ainsi :* $L_1 - L_0 = 425Q_1 \frac{T_1 - T_0}{T_1}$.

— 44, — 4 : travail AP ; *lisez :* travail P dont l'équivalent en chaleur est AP.

— 44, — 8 et 9 : travail exécuté sera $A\alpha p v$; *lisez :* travail exécuté sera $\alpha p v$ et l'équivalent en chaleur sera $A\alpha p v$.

— 61, — 8 : nord au sud ; *lisez :* sud au nord.

— 61, — 10 : sud au nord ; *lisez :* nord au sud.

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE PREMIER

DU CALORIQUE

LIVRE II

DE LA LUMIÈRE

LIVRE III

DE L'ÉLECTRICITÉ

LIVRE IV

CONSTITUTION DE LA MATIÈRE

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH 1






3 2044 051 727 899

